

GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/GaAs 窄量子阱中 激子线宽与温度的关系*

金世荣 褚君浩 汤定元 罗晋生**

(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)

徐仲英[√] 罗昌平 袁之良 许继宗 郑宝真

(中国科学院半导体研究所, 超晶格和微结构国家实验室, 北京, 100083)

0471.3
TN201

A 摘要 研究了具有不同阱宽的 GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 窄量子阱结构中激子线宽与温度的关系, 发现在低温范围内, 声学声子的线性散射系数随着阱宽的减小而增加, 对实验结果作了讨论。

关键词 激子线宽, 声学声子散射, 半导体量子阱。

⑩ 引言

激子线宽是直接影响量子阱器件光学和电光特性的关键性材料参数之一。在半导体量子阱中, 由于受不同散射机制的影响, 激子发射谱线和吸收谱线不再是 δ 型的, 而是呈现一定的展宽。研究激子谱线的展宽机理及其随温度的变化, 可以得到量子阱与外延生长有关的界面质量^[1,2]、杂质散射^[3]、激子的束缚与热离化现象^[5]、以及准二维系统中激子与声子之间的相互作用等信息^[6], 这些对器件应用具有特别重要的意义。

本文研究 GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 窄量子阱结构中激子线宽与温度的关系, 在 11~90K 的温度范围内, 观察到声学声子的线性散射系数随阱宽的减小而增加, 与 Lee 等人^[3]的声学声子散射模型预期值一致。

1 实验及装置

我们研究了 2 种不同材料的典型量子阱结构, 样品 A 是 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子阱结构, 包含阱宽分别为 1.0、1.7、3.0 和 5.0nm 4 个量子阱, 样品 B 为 In_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 单量子阱结构, 包含 2 个阱宽分别为 1.6 和 6.0nm 的量子阱。所有样品均用 MBE 技术在 GaAs(001)面上外延生长, 不故意掺杂, 生长中样品 B 控制在临界厚度之内。

稳态荧光光谱实验采用 Ar⁺激光器的 514.5nm 谱线作为激发光源, 荧光信号经 0.85m 的双光栅单色仪色散后, 由标准光子计数系统接收。实验中通过调小单色仪的狭缝, 可以得到 0.15meV 的光谱分辨率。在 50K 以下的低温范围内对所有量子阱的 PL 光谱测量得到窄

* 国家自然科学基金资助项目
** 西安交通大学微电子研究室, 陕西, 西安, 710049
本文 1995 年 7 月 6 日收到, 修改稿 1995 年 12 月 20 日收到

而强的荧光信号,并且,测量激子峰低能边没有发现明显的杂质峰出现,而激子峰也较好地满足洛仑兹或高斯线型,表明在我们的样品量子阱结构完整,杂质的影响可以忽略不计.

2 结果与讨论

图 1 给出了样品 A 中 4 个不同阱宽的量子阱的激子线宽随温度的变化. 从图可看出: 在低温范围内, 对于所有的量子阱, 随着温度的增加, 激子线宽均呈现线性增加的趋势, 而在 11K 时, 激子线宽表现出强烈的阱宽依赖关系. 一般地说, 窄阱激子的线宽明显大于宽阱激子的线宽, 并且随着阱宽的减小, 激子线宽明显地增加.

量子阱中自由激子的线宽(FWHM)可以表示为^[3,4]

$$\Gamma_{ex}(T) = \left| \frac{\partial E_x}{\partial L_x} (\delta L_x) \right| + \Gamma_{imp} e^{-\langle E_B \rangle / kT} + \Gamma_{LA} T + \frac{\Gamma_{LO}}{e^{h\nu_{LO}/kT} - 1} + \Gamma_0, \quad (1)$$

式中右边前 2 项与量子阱样品生长过程中的非完善性有关, 第一项代表因阱宽起伏及合金起伏引起的展宽, 它与温度无关; 第二项为电离杂质产生的散射, 这里 $\langle E_B \rangle$ 为平均杂质束缚能; 后 3 项分别代表声学声子散射和光学声子散射引起的展宽以及激子的本征展宽(后者的典型值为 0.125meV). 对于较高质量的样品, 杂质散射的影响可以忽略不计. 由于光学声子只在较高的温度下才起作用, 因此当温度 $T \rightarrow 0$ 时, 对于阱宽较小的量子阱, 阱宽起伏或者合金起伏散射是决定量子阱激子线宽展宽的主要散射机制, 而在低温范围内, 激子与声学声子的相互作用决定了激子线宽的温度特性.

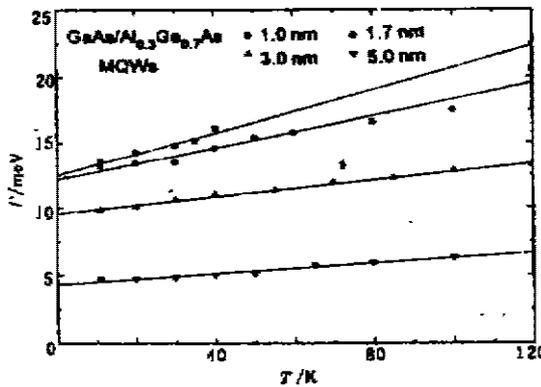


图 1 不同阱宽的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 窄量子阱激子线宽随温度的变化
Fig. 1 Exciton linewidths for GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum wells with different widths as a function of temperature

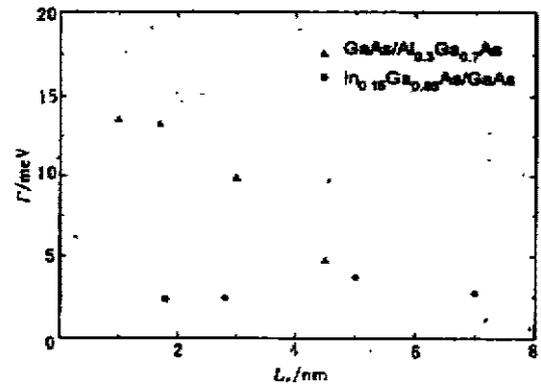


图 2 在 11K 温度下 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 样品 A (▲) 的激子线宽
Fig. 2 Exciton linewidths of the GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As sample A (▲) measured at 11K

为了说明样品 A 中激子线宽在低温 11K 时的性质, 我们在图 2 给出了 11K 下量子阱激子线宽与阱宽的关系. 为了比较, 我们还给出了另一组 InGaAs/GaAs 样品的测量结果(如图中 ● 所示). 从图 2 可以看出, 在 GaAs/AlGaAs 系统中, 激子线宽表现出强烈的阱宽依赖

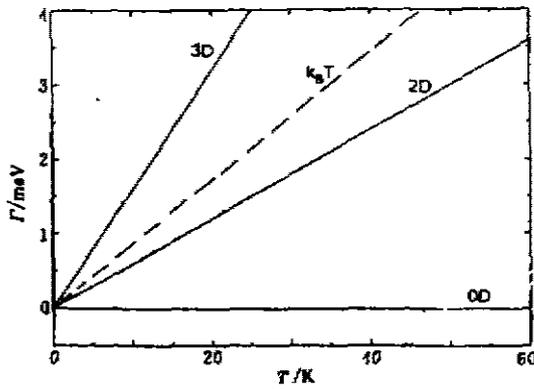


图 3 具有不同维度的各种系统中激子的热展宽与温度关系的示意图.

Fig. 3 Schematic diagram of the thermal broadening of the exciton in various systems with different dimensionality as a function of temperature.

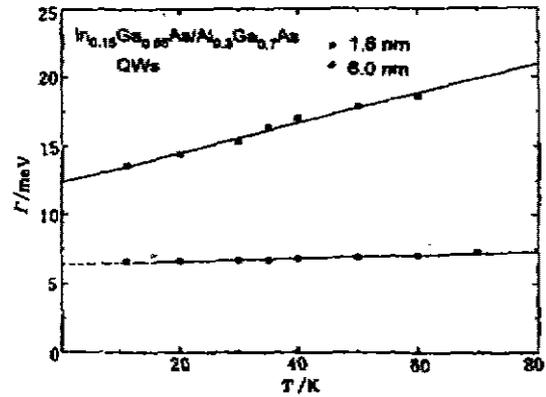


图 4 不同阱宽的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱系统中激子线宽随温度的变化.

Fig. 4 Temperature dependence of exciton linewidths for $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ with different well widths

关系,并且随着阱宽的增加,激子线宽很快地减小,并趋向于激子的本征展宽.而在 InGaAs/GaAs 系统,激子线宽几乎与阱宽无关,且又远大于激子的本征展宽(至少在一个数量级以上).造成这种差异的原因可以归结为上述两种量子阱材料体系的明显差别.在 GaAs/AlGaAs 结构中,阱材料为 GaAs,势垒为 AlGaAs 合金材料,在低温下,由于激子波函数主要局域于阱内,合金散射的影响可以忽略不计,因量子阱界面起伏引起的散射过程决定了激子的谱线展宽.只有当阱宽趋于零时,由于激子波函数向势垒层的显著渗透和扩展,才使界面起伏的影响逐渐减弱.而在 InGaAs/GaAs 系统中,情况与此相反,阱材料为合金材料 InGaAs,实验表明,量子阱界面起伏的影响可以忽略不计,合金散射过程是激子谱线展宽的主要机制,并导致激子线宽几乎与阱宽无关.这里必须指出,对 InGaAs/AlGaAs 量子阱体系所作的类似分析表明,量子阱界面粗糙度散射和合金散射都是影响激子线宽的重要因素,但是在窄阱情况下,以界面粗糙度散射为主,而在宽阱情况下,界面粗糙度散射的影响可以忽略,合金散射起了更为重要的作用.

在低温范围内,激子线宽的增加主要归结为声学声子散射的贡献,实质上它是由于激子受到单个声学声子的反斯托克斯散射而引起的,因为声学声子的散射几率与声学声子的布居数成正比,结果是在低温范围内,激子线宽随着温度的增加呈线性增长.只有当温度达到并超过某一值时,光学声子的影响才变更为重要,并开始起主要作用,而导致激子线宽的非线性增加.实验表明,所有量子阱的激子线宽随温度的变化较好地符合这种规律,但是我们发现 2 个明显的差别:一是对应于不同的阱宽,光学声子开始起主要作用的温度值不同,并且小的阱宽对应于较低的温度值(例如,对于 1nm 的窄量子阱, $T \approx 35\text{K}$, 对于 5nm 的量子阱, $T \approx 120\text{K}$; 其次是对我们这里研究的窄阱体系,在低温范围内,阱宽从 1.0~5.0 nm 的 4 个量子阱线性散射系数分别为 79、47、33 和 $11\mu\text{eV}/\text{K}$, 而三维 GaAs 体材料为 $17\mu\text{eV}/\text{K}$. 随着阱宽的减小,声学声子线性展宽因子 Γ_{LA} 迅速增大,表明声学声子散射在窄阱情况下

得到增强,这一结果与文献上报道的宽阱情况下的结果恰恰相反^[7,8]. Schultheis 等人^[7]和 Srinivas 等人^[8]的实验结果表明,在宽阱情况下,线性散射系数 Γ_{LA} 将随着阱宽的减小而减小.

量子理论预期,声学声子的散射几率及线性散射系数与激子的维度数密切相关.一般来说,随着激子维度数的下降,声子散射几率减小,线性散射系数也减小(如图 3 所示),因此人们往往期望声子散射几率在低维系统里得到有效的抑制.例如,最近对低温下量子点的实验已经观察到与零维 δ -函数型电子态密度相对应的激子谱线热展宽的消失^[9].这也很好地解释了在宽阱情况下线性散射系数 Γ_{LA} 随着阱宽的减小而减小的结论实验结果,因为在宽阱情况下,阱宽的减小将导致激子特征从三维向准二维发生转变.然而需要指出的是,在量子阱系统中,由于半导体异质结材料只能提供有限的量子限制势,因此当阱宽变窄时,激子波函数并不局限于阱内,相反地,由于它向势垒层的显著渗透及展宽,使得量子阱中的激子不能达到真正的二维极限.由于激子波函数沿 Z 方向的有限展宽,使得量子阱中的激子既不同于体材料中的三维激子,也区别于严格意义下的理想二维激子,而具有准二维特征.这种准二维特征显著地修正了半导体量子阱系统的光学特性^[10~13].激子的这种准二维特征必然影响激子-声子之间的相互作用.

Lee 等人^[9]给出窄量子阱情况下的声学声子散射模型,他们考虑到无限深势阱中因压电和形变两种势散射引起的声学声子线性散射系数的结论如下:

$$\text{对于压电势散射有} \quad \Gamma_{LA} = \frac{k_B e^{-2M u_x / h}}{24 \rho u^3 h} \left(\frac{4\pi e}{\epsilon} \right)^2 (H^{(e)} - H^{(h)})^2, \quad (2)$$

$$\text{对于形变势散射有} \quad \Gamma_{LA} = \frac{3M k_B}{4 \rho u^2 h^2 L_x} (D_c - D_v)^2. \quad (3)$$

其中 ρ 是质量密度, u 是声学声子速度, M 是激子质量, L_x 是量子阱宽度, $H^{(e)}$ ($H^{(h)}$) 代表电子(空穴)的压电常数, D_c (D_v) 代表导带(价带)的变形势, ϵ 是介电常数.然而理论上计算线性散射系数 Γ_{LA} 随阱宽的变化是非常复杂的.首先,在窄阱情况下激子波函数及其关联的电子-空穴库仑作用的复杂性,其次,从式(2)和(3)可以看到,线性散射系数通过激子质量与电子和空穴有效质量发生联系.众所周知,量子阱中电子和空穴有效质量与三维体材料中的电子和空穴有效质量有着很大的差别,但是实验上,量子阱中电子和空穴的有效质量,特别在窄量子阱情况下,随阱宽的变化至今还不十分清楚.尽管如此,仍可得到定性的结论,即声学声子散射过程在窄阱情况下得到增强.作为一级近似,只考虑量子阱阱宽 L_x 对线性散射系数 Γ_{LA} 引起的变化而忽略其它项的影响,那么在与阱宽的关系上,压电势散射给出指数衰减关系,形变势散射则给出反比关系,我们的实验结果基本上给出了这种变化趋势.

我们还测量了另一组阱宽分别为 1.6 和 6.0 nm 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 窄量子阱结构的激子线宽与温度的关系,结果如图 4.从图中可以看到与 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 系统相类似的变化,即窄阱的声学声子线性散射系数明显大于阱宽的数值(分别为 107 和 $8.3 \mu\text{eV}/\text{K}$),与上述的声学声子散射模型预期相一致.值得注意的是,与 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 系统相比,在 $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ 结构中,随着阱宽的减小,声学声子线性散射系数的增加更快.其原因可能归结为组成 $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ 结构中的两种材料参数(例如电子、空穴)有效质量、介电

常数、晶格常数等差别更大,而从式(2)和(3)可以看到量子阱结构材料参数的差别将影响线性散射系数的变化.最后需指出,在窄量子阱情况下,当阱宽进一步减小而趋近于零时,无限深势阱的声子散射模型已不再成立,也就是 L_0 还须计入由于激子波函数向势垒层的渗透和展宽部分,结果是当阱宽趋于零时,声学声子散射系数趋于三维 AlGaAs 体材料数值,这一点还有待于实验上证实.

3 结语

我们研究了不同阱宽的 GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 窄量子阱结构中激子线宽与温度的关系,发现,在低温范围内,在这两种量子阱材料中,随着阱宽的减小,声学声子的线性加宽因子有显著的增加,与 Lee 等人^[3]的声学声子散射模型预期相一致.

参考文献

- 1 Golub J E, Liao P F, Eilenberger D J, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**:2584
- 2 Herman M A, Bimberg D, Christen J. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**:R1
- 3 Lee J, Koteles E S, Vassell M O. *Phys. Rev.*, 1986, **B33**:5512
- 4 Chen Y J, Koteles E S, Lee J, et al. *Proc. SPIE*, 1987, **792**:162
- 5 Colocci M, Gurioli M, Vinattieri A J. *Appl. Phys.*, 1990, **68**:2809
- 6 Lyon S A. *J. Lumin.*, 1986, **35**:121
- 7 Schultheis L, Honold A, Kuhl J, et al. *Phys. Rev.*, 1986, **B34**:9027
- 8 Srinivas V, Hryniewicz J, Chen Y J, et al. *Phys. Rev.*, 1992, **B46**:10193
- 9 Grundmann M, Christen J, Ledentsov N N, et al. 1995, *Phys. Rev. Lett.*, **74**:4043
- 10 Feldmann J, Peter G, Gobel E O, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**:2337
- 11 Cebulla U, Bacher G, Forchel A, et al. *Phys. Rev.*, **B39**:6257
- 12 Jin S R, Xu Z Y, Luo J S, et al. *物理学报(海外版)*, 1994, **3**:384

TEMPERATURE DEPENDENCE OF EXCITON LINEWIDTHS IN NARROW GaAs/AlGaAs AND InGaAs/AlGaAs QUANTUM WELLS*

Jin Shirong Chu Junhao Tang Dingyuan Luo Jinsheng**

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

Xu Zhongying Luo Changping Yuan Zhiliang Xu Jizong Zheng Baozhen

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

Abstract Temperature dependence of exciton linewidths in GaAs/AlGaAs and InGaAs/AlGaAs quantum wells with very narrow well widths was investigated. The increase of the acoustic phonon linear scattering coefficient was found with decreasing well width in low temperature range. The experimental results were discussed.

Key words exciton linewidth, acoustic phonon scattering, semiconductor quantum well.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
** Division of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China.