

131-136

InAs/GaAs 亚单层结构的静压光谱研究*

李国华 韩和相 汪兆平

(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)

李伟 王占国

(中国科学院半导体研究所, 半导体材料科学实验室, 北京, 100083)

TX/304.23

0472.3

10

摘要 在15K下测量了InAs/GaAs亚单层结构的静压光致发光, 静压范围为0~8GPa. 常压下InAs层中重空穴激子的发光峰随InAs层厚的减小向高能移动, 同时峰宽变窄, 强度减小. 其压力行为与GaAs基体的基本一致, 表明量子阱(线、点)模型仍适用于InAs/GaAs亚单层结构. 得到平均厚度为1/3单分子层的样品中由于附加的横向限制效应引起的电子和空穴束缚能的增加分别为23和42meV.

关键词 InAs/GaAs 亚单层, 静压, 光致发光.

砷化镓 衬体

引言

InAs/GaAs 异质结构因其独特的光学性质, 在光电子器件领域有广泛的应用前景, 近年来已有很多理论和实验研究^[1~6], 由于InAs和GaAs的晶格常数相差近7%, 只有很薄的InAs层才能与GaAs基体形成无晶格弛豫的应变结构, 原子力显微镜研究表明^[7], 当InAs层的厚度超过约1.5个单分子层厚(1个单分子层包括1层In原子和1层Ga原子, 约0.3nm厚)时, InAs层的二生长模式会转变为岛状生长模式, 但即使约1个单分子层的InAs嵌入在GaAs基体中, 也能观测到相当强的与InAs有关的发光峰. 近年来人们又发现, 当InAs层的平均厚度小于1个单分子层时, 它的光致发光峰变窄并随着平均厚度的减小逐渐向高能方向移动^[3]. 由于微观上InAs层的最小厚度为1个单分子层, 平均厚度小于1层意味着InAs并未完全铺满1层, 通常人们把它称为亚单层结构, 此时的平均厚度实际上表示InAs在GaAs上的覆盖度.

通常有两种解释InAs/GaAs亚单层结构发光机理的模型: 一种是仍将InAs单分子层看作窄的量子阱, 在亚单层情况下形成单分子层厚的岛或线, 从而引入附加的横向限制, 此时InAs层仍可采用其体材料参数而量子限制效应是发光峰能量变化的主要原因^[3]; 另一种是认为薄的InAs层的嵌入破坏了GaAs的平移对称性, 从而在GaAs的禁带中引入局域能级, 类GaAs的激子束缚在此能级上形成发光中心^[2]. 由于In和Ga都是III族元素, 也有人把这种能级与In等电子陷阱联系起来.

静压光致发光研究可以用来区分这两种模型, 在InAs/GaAs量子阱(线、点)结构中, 阱

*国家自然科学基金资助项目, 编号 69577017
本文1996年11月12日收到

中发光的压力行为与 GaAs 的压力行为基本相同,而等电子陷阱的压力行为与基体的压力行为则有很大不同.

我们测量了 InAs/GaAs 亚单层结构的低温静压光致发光,发现与 InAs 有关的发光峰的压力系数与 GaAs 基体基本相同,表明量子阱(线、点)模型仍可用于此结构.在此基础上我们得到了 InAs 平均厚度为 1/3 层的样品中由于附加的横向限制效应引入的电子束缚能的增加为 23meV,空穴束缚能的增加为 42meV.

1 样品与实验

样品用分子束外延方法生长在半绝缘的(001)GaAs 衬底上.首先在 600℃ 温度下生长 0.3 μm 的 GaAs 缓冲层,然后在 400℃ 温度下进行 InAs 亚单层生长,生长速率为 0.2ML/s.最后在 580℃ 温度下生长 10nm 的 GaAs 盖层. InAs 层的厚度由 RHEED 振荡测量,并经高分辨 X 射线双晶衍射校正.

静压由金刚石对顶砧压室产生.被测样品从背面机械减薄至约 30 μm 厚,切成约 100 μm 见方的小块装入压室中,压室中还用一小粒红宝石作压力定标.传压介质为氩.压室装在 APD-DE202 闭循环低温制冷机的冷头上,测量时样品室的温度为 15K.测量在由 J-Y 公司的 HRD-2 双光栅单色仪和显微镜组成的显微光路系统上进行,激发光源为光谱物理公司 SP-165 氩离子激光器的 488.0nm 线,激发功率密度约 $10^2 \sim 10^3 \text{W}/\text{cm}^2$.

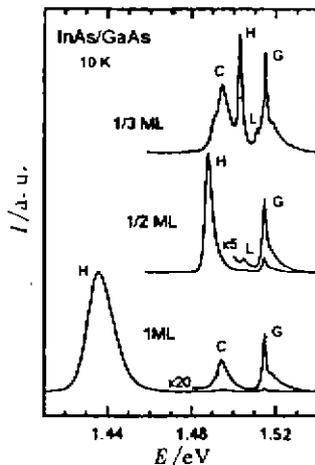


图 1 常压下不同 InAs 层厚的 InAs/GaAs 亚单层结构的低温光致发光谱
Fig. 1 Photoluminescence spectra of InAs/GaAs submonolayer structure with different InAs layer thickness at low temperature and normal pressure

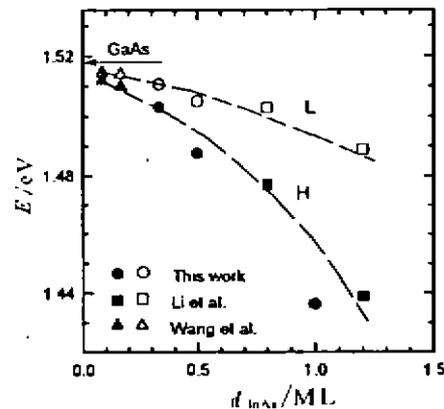


图 2 InAs 层中重空穴(H)和轻空穴(L)激子发光峰的峰值位置随 InAs 层厚的变化
Fig. 2 Dependence of the peak energies of heavy hole (H) and light hole (L) excitation emissions on InAs layer thickness

2 结果和讨论

图 1 给出了在金刚石压室外测得的 InAs/GaAs 亚单层结构的 10K 光致发光谱. 3 块样品

的 InAs 层厚度分别是 1/3, 1/2 和 1ML (单分子层厚). 图中除观测到 GaAs 基体的自由激子发光峰(G)和碳受主有关发光峰(C)外, 还有与 InAs 层有关的重空穴激子发光峰(H)和轻空穴激子发光峰(L). 从图中可以看到, 随着 InAs 层厚度的减小, H 和 L 峰均向高能方向移动. 图 2 给出了测得的 H 和 L 峰的峰值位置随 InAs 层厚的变化, 图中同时给出了 Li 等^[4]和 Wang 等^[8]的数据. 从图中可以很明显地看到, 随着 InAs 层厚的减小, H 和 L 峰的差距减小并逐渐趋向 GaAs 发光峰的位置(图中箭头所示). 从图 1 还可以看到, 随着 InAs 层厚的减小, H 发光峰的峰宽变窄, 相对于 GaAs 发光峰 G 的强度也减弱, 这些特点都与 Wang 等的结果^[3,8]相同.

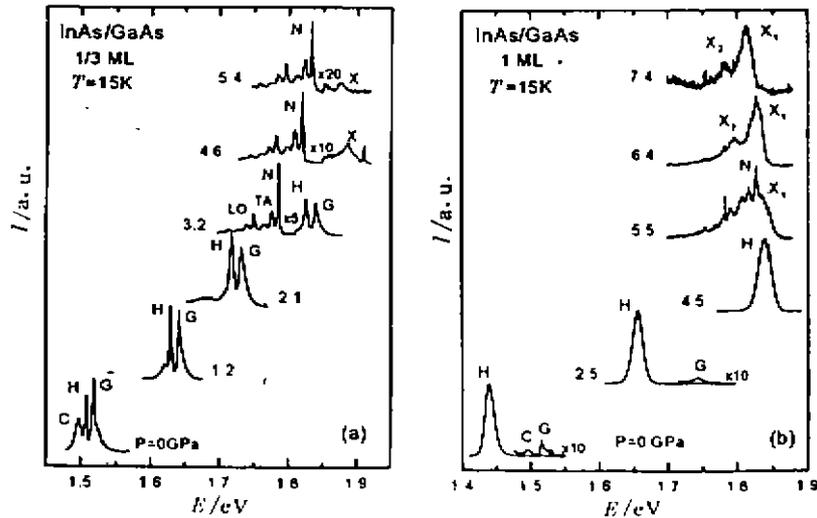


图 3 (a) 1/3ML 和 (b) 1ML 层厚的 InAs/GaAs 亚单层结构在不同压力下的光致发光谱

Fig. 3 Photoluminescence spectra of (a) 1/3 ML and (b) 1 ML layer thickness InAs/GaAs submonolayer structure under different pressure

图 3(a) 和 (b) 分别给出 1/3ML 和 1ML 样品在不同压力的静压光致发光谱. 零压下的结果与在压头外测得的结果基本相同, 只是由于在压头中测得的信号较弱, 1/3ML 样品中 L 峰很难分辨出来. 随着压力升高, H 峰和 G 峰均向高能方向移动, 两峰间距离没有明显变化. 在压力超过约 2.5GPa 时, 在 1/3ML 样品中出现一组新峰(N), 它们也随压力的增加向高能方向移动, 但移动速度没有 H 和 G 峰那么快, 其归属将在后文讨论. 在 1ML 样品的 5.5GPa 谱图中也观测到类似的谱线结构. 当压力超过约 4.2GPa 时, H 和 G 峰的强度迅速减弱并很快消失, 从图 4 发光峰峰值强度的压力关系中可以看得更清楚. 这是由于在 4.2GPa 左右 GaAs 中发生了 Γ -X 交叉^[9], X 能谷逐渐成为最低能谷, Γ 谷中的电子迅速转移到 X 能谷中. 压力继续升高, 在 1ML 样品的谱图中出现两个弱的新峰(X_1 、 X_2), 它们的压力行为与 GaAs 基体的导带 X 谷到价带顶的间接跃迁发光峰的行为类似. 与文献[4]中的 M_1 、 M_2 峰类似, 我们也将 X_1 峰归结为从 GaAs 导带 X 谷到 InAs 重空穴态的 I 类跃迁发光, 而将 X_2 峰归结为 InAs 层中导带 X_{xy} 能谷到重空穴态的 I 类跃迁发光. 在 1/3ML 样品谱图中只观测到一个间接跃迁发光峰(X), 根据文献[4]的分析, 它相当于 1ML 样品中的 X_1 峰.

图 5 给出 1/3ML 和 1ML 样品的发光峰的峰值能量随压力的变化, 图中的实线是用一

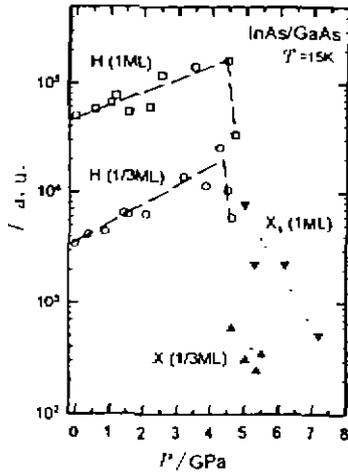


图4 InAs/GaAs 亚单层结构的光致发光峰的峰值强度随压力的变化
Fig. 4 Pressure dependence of peak intensities of InAs/GaAs submonolayer structure

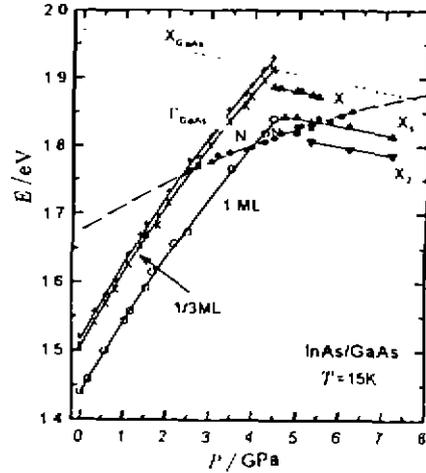


图5 InAs/GaAs 亚单层结构的光致发光峰的峰值能量随压力的变化
Fig. 5 Pressure dependence of peak energies of InAs/GaAs submonolayer structure

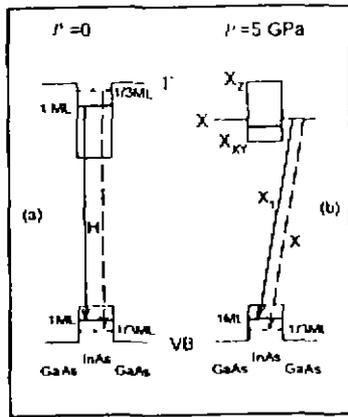


图6 (a) 常压和(b)5 GPa 压力下 InAs/GaAs 亚单层结构的能级示意图及发光峰对应的跃迁能级

Fig. 6 Sketch of the energy level position in InAs/GaAs submonolayer structure under (a) normal pressure and (b) 5 GPa, Arrows indicate the assignment of observed emission peaks

阶或二阶多项式对实验数据进行最小二乘法拟合的结果,拟合参数如表 1 所示. 点线是 GaAs 导带 X 谷到价带顶的间接跃迁发光峰的压力关系^[4]. 图 5 中实心圆点和方块分别是 1/3ML 和 1ML 样品中 N 谱线中主峰的峰值能量位置,虚线是根据 Wolfod 在 GaAs 中测得的氮等电子陷阱的 N_x(B)峰峰值位置的的压力关系^[10]画出. 可以看到,实验点基本上都落在线上,而且图 3(a)中 N 谱线组的结构(主峰 N 线伴随着 TA、LA、TO 等一系列声子伴线)也与 Wolfod 等测得的结果^[10]相同,因此我们仍将此组谱线归结为 GaAs 中氮等电子陷阱的发光. Leroux 等^[11]也曾在分子束外延生长的 GaAs: Si 样品中观测到氮等电子陷阱的发光,并指出氮可能来源于氯化硼坩埚的污染. 我们的样品可能也属于这种情况.

在 InAs/GaAs 亚单层结构中,如果将 InAs 单分子层看作限制在 GaAs 中的薄量子阱,而覆盖度小于 1 时 InAs 层形成一个个单分子层厚的小岛嵌入 GaAs 基体中,横向的附加限制将使 InAs 有关发光峰的峰值能量变高. 而且由于 InAs 和 GaAs 都是直接带隙半导体,阱中发光峰的压力系数应介于 InAs 和 GaAs 的压力系数之间^[12]. 在我们的情况下,阱中发光峰的能量接近 GaAs 发光峰,其压力行为也应与 GaAs 的压力行为类似. 另一方面,

在 InAs/GaAs 亚单层结构中,如果将 InAs 单分子层看作限制在 GaAs 中的薄量子

如果将 InAs 亚单层结构看作在 GaAs 基体中引入的 In 等电子陷阱,则与 InAs 有关的发光峰来自束缚在等电子陷阱上的激子的发光,由于等电子陷阱是深能级,它的压力行为与导带底的压力行为有很大不同,就象 GaAs 中的氮等电子陷阱那样^[10]. 我们的压力实验表明, InAs 有关发光峰的压力行为与 GaAs 的行为非常相似,因此支持量子阱(线、点)的模型而不支持等电子陷阱的模型. 这可能是由于分子束外延生长 InAs 层中 In 原子之间的互相耦合比较强,与通常掺杂引进的等电子陷阱还有一定差别. 也许当 InAs 层的覆盖度非常小时 InAs 有关发光峰的压力行为会与等电子陷阱模型有些类似.

表 1 InAs/GaAs 亚单层结构中光致发光峰的压力系数

$$(E = E_0 + a_1 \times P + a_2 \times P^2)$$

Table 1 Pressure coefficient of PL peaks in InAs/GaAs submonolayer structure

样 品	H			X ₁ , X	
	E ₀ (eV)	a ₁ (eV/GPa)	a ₂ (eV/GPa ²)	E ₀ (eV)	a ₁ (eV/GPa)
1ML	1.439	0.106	-3.8 × 10 ⁻³	1.897	-0.012
1/3ML	1.504	0.113	-4.9 × 10 ⁻³	1.949	-0.014
GaAs(G)	1.516	0.114	-5.0 × 10 ⁻³	1.971*	-0.013*

* 取自文献[4]

在量子阱(线、点)模型中,1ML 样品可以看作 1 个单分子层厚的 InAs 量子阱,而 1/3ML 样品可以看作 1 个单分子层厚的量子点或量子线,这样,可以认为 H 发光峰的能量位置的增加来源于附加横向限制效应引起的电子和空穴束缚能的增加,如图 6(a)所定性表示的. 由于我们还观测到了从 GaAs 的 X 能谷到 InAs 重空穴态的 X₁ 发光峰,可以独立地得到空穴束缚能的增加,如图 6(b)所示,由此分别得到电子和空穴束缚能的增加. 在此实验中,常压下 1/3ML 样品的 H 峰比 1ML 样品高 65meV,5GPa 时 1/3ML 样品的 X 峰比 1ML 的 X₁ 峰高 42meV,因此我们得到在此情况下电子束缚能的增加为 23meV,空穴束缚能的增加为 42meV.

3 结论

3.1 常压下,在 InAs/GaAs 亚单层结构中观测到了与 InAs 层有关的重空穴激子发光峰 H 和轻空穴激子发光峰 L,随着 InAs 层厚的减小,H 峰的峰值能量增加、峰宽变窄,相对与 GaAs 发光峰强度变弱.

3.2 加压后,H 峰向高能方向移动,其压力系数与 GaAs 的压力系数基本相同,在压力超过 4.2GPa 时还观测到了与 X 能谷有关的发光峰,实验结果支持量子阱(线、点)的观点.

3.3 在压力超过 2.5GPa 时一组新谱线的能量位置与压力行为和文献[4]中 GaAs 中氮等电子陷阱的行为一致,指认为来源于 GaAs 基体中的氮等电子陷阱发光.

3.4 根据量子阱(线、点)的模型,1/3ML 样品中由于附加的横向限制效应引起的电子束缚能的增加为 23meV,空穴束缚能的增加为 42meV.

参考文献

- 1 Brandt O, Tabfer L, Cingolani R, *et al.* *Phys. Rev.*, 1990, **B41**:12599
- 2 Cingolani R, Brandt O, Taper L, *et al.* *Phys. Rev.*, 1990, **B42**:3209
- 3 Wang P D, Ledentsov N N, Torres C M S, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**:1526
- 4 Li G H, Goni A R, Abraham C, *et al.* *Phys. Rev.*, 1994, **B50**:1575
- 5 Shireishi K, Yamaguichi E. *Phys. Rev.*, 1990, **B42**:3064
- 6 Li S S, Xia J B, Yuan Z L, *et al.* *Phys. Rev. B*, to be published
- 7 Leonard D, Pond K, Petroff P M. *Phys. Rev.*, 1994, **B50**:11687
- 8 Wang P D, Ledentsov N N, *et al.* *Phys. Rev.*, 1994, **B50**:1604
- 9 Wolford D J, Bradley J A. *Solid State Commun.*, 1985, **53**:1069
- 10 Wolford D J, Bradley J A, Fry K, *et al.* *Proceedings of 17th International Conference on the Physics of Semiconductors*, ed by J. D. Chad, W. A. Harrison, New York: Springer, 1984, 627
- 11 Leroux N G, Verie C. *Solid State Commun.*, 1986, **58**:289
- 12 Li G H, Zheng B Z, Han H X, *et al.* *Phys. Rev.*, 1992, **B45**:3489

PHOTOLUMINESCENCE OF InAs/GaAs SUBMONOLAYER STRUCTURE UNDER HYDROSTATIC PRESSURE*

Li Guohua Han Hexiang Wang Zhaoping

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

Li Wei Wang Zhanguo

*(Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)*

Abstract The photoluminescence of InAs/GaAs submonolayer structure was measured at 15K under hydrostatic pressure up to 8 GPa. At normal pressure, the peak energies of the heavy hole exciton emission have a blue shift with the decrease of the thickness of the InAs layer, and with a narrowing peak width and weakening peak intensity. The pressure behavior of these peaks is similar to that of the GaAs matrix, indicating that the model of quantum well (quantum wire, quantum dot) structure is still valid for InAs/GaAs submonolayer. The increases of the confined energies for electrons and heavy holes are 23 and 42 meV, respectively, for 1/3 monolayer InAs/GaAs sample due to the additional lateral confinement of carriers.

Key words InAs/GaAs submonolayer, hydrostatic pressure, photoluminescence.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China