

自组织生长多层垂直耦合 InAs 量子点的研究*

王志明 邓元明 封松林 吕振东 陈宗圭 王凤莲 徐仲英 郑厚植

(中国科学院半导体研究所 超晶格微结构国家重点实验室 北京 100083)

高 旻 韩培德 段晓峰

(中国科学院北京电子显微镜实验室 北京 100080)

摘要 本文报道了关于 InAs/GaAs 自组织生长多层垂直耦合量子点的研究结果. 透射电子显微镜测量显示多层量子点在生长方向上成串排列, 有些量子串会发生融和. 还有些量子串生长不完全, 也就是说包含的量子点个数少于 InAs 层数, 并由此导致多层耦合量子点的光致发光谱具有高能带尾.

PACC: 6885, 6116D, 7855

1 引言

在 GaAs 衬底上自组织生长 InAs 量子点结构, 有非常高的发光效率, 在低维物理特性研究和器件应用方面具有重要意义. GaAs 和 InAs 之间存在较大的晶格失配(7%), 在 GaAs 衬底上生长 InAs 是一种典型的 Stranski-Krastanov 生长模式, 即当 InAs 覆盖层超过临界厚度时, InAs 由二维平面生长变为三维成岛生长, 其结构由一层浸润层和在它上面分布的岛状结构组成. 这些岛状结构可以看作 InAs 量子点. 为了提高单位体积内量子点的数量, 人们研究了多层量子点结构, 发现当量子点的间隔层不是很厚时, 量子点发生垂直耦合, 即在其生长方向成串排列^[1~3]. 国外个别研究小组已利用多层垂直耦合量子点结构制备了性能较好的发光二极管^[4]、激光器^[5~7]等原型器件, 认为这种结构具有广阔的应用前景.

本文报道我们关于多层垂直耦合 InAs 量子点的研究结果. 透射电子显微镜(TEM)显示多层量子点纵向成串排列, 但有时量子串会发生融合, 也有些量子串并没有生长完全. 和单层量子点发光相比, 多层垂直耦合结构的光致发光谱具有高能带尾, 我们在本文中也给出了合理解释.

* 国家自然科学基金和国家攀登计划资助项目

王志明 男, 1969年生, 博士生, 目前从事低维化合物半导体材料生长研究

邓元明 男, 1973年生, 硕士生, 目前从事低维化合物半导体材料生长研究

封松林 男, 1964年生, 研究员, 目前从事低维半导体物理性质研究

1997年1月16日收到初稿, 1997年2月20日收到修改稿

2 实验

实验所用样品由 VG 公司 V80H MKII 分子束外延 (MBE) 设备生长, GaAs(100) 衬底在 MBE 系统中 580°C 脱氧后, 先生长 0.5 μm GaAs 缓冲层, 生长温度为 600°C, 然后将生长温度降至 450°C, 再生长量子点区。最后淀积 20nm GaAs 覆盖层。在本文中, 量子点区对单层量子点结构而言就是 2.5 个单原子层 (Monolayer, ML) 的 InAs, 而对多层耦合量子点结构是 AlAs (1.5nm)/GaAs (6nm)/InAs (2.5ML)/GaAs (6nm) 重复 20 次。样品的结构示意图如图 1。As₄ 的等效束流为 1.2×10^{-3} Pa, GaAs 的生长速度为每小时 1.1 μm , InAs 的生长速度为每秒 0.11ML。由于 AlAs 层在电镜照片中比较明亮, 可以作为标记层。

透射电镜测量是在 Philips CM200 FEG 电子显微镜上进行的。光学测量采用常规的光致发光技术, 用氦离子激光器的 514.5nm 线激发, 低温 Ge 探测器探测。

3 实验结果及讨论

3.1 透射电子显微镜结果

图 2 是透射电镜截面像, 可以清晰地看到多层量子点成串纵向排列。在这张照片上, 由下而上首先是 GaAs 缓冲层上明亮的 AlAs 薄层, 然后是 GaAs 6nm, 在其上是黑色的 InAs

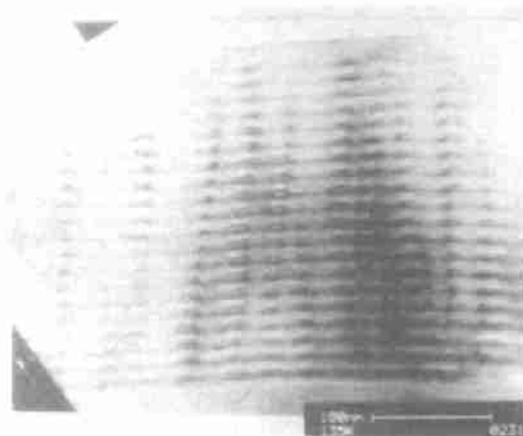


图 2 多层垂直耦合 InAs 量子点结构的透射电子显微镜截面像

浸润层及岛状结构, 然后又是在 GaAs 及 AlAs 等周期排列。量子点的尺寸比较均匀, 平均直径为 10nm, 高度约为 5nm^[8]。InAs 和 GaAs 之间具有较大失配, 不仅 InAs 岛状结构内部发生应变, 而且也引发其上的 GaAs 和 AlAs 层发生局部应变, 产生应力场的不均匀分布。根据自由能最低的原则, 上层 InAs 淀积时将倾向于淀积在与 InAs 相比应变最小的地方, 也就是下层 InAs 岛的正上方, 由此而形成量子点的垂直耦合。Teroff 等人^[9]的简单模型预期, 在某些情况时下层两个或更多个岛状结构, 在其生长过程中有可能在上方合成一个岛, 在我们的 TEM 照片中, 这种情况首先在实验上得到了证实。和这简单模型的计算结果相一致, 我们还发现有一些量子串生长不完全, 或者没有持续生长到顶层, 或者是从中途新产生的量子串。量子串并非完全垂直由下而上生长, 串弯曲导致有些完整的量子串在 TEM 截面像上也会表现为生长不完全, 这方面的问题我们正在进一步研究。

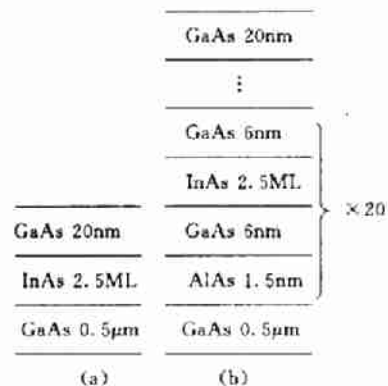


图 1 样品结构示意图
(a) 单层 InAs 量子点;
(b) 多层垂直耦合 InAs 量子点。

3.2 光致发光谱

图 3 是 13K 温度下多层耦合量子点结构和单层量子点结构光致发光谱的比较, 激发功率 4~5mW. 很显然, 由于多层量子点之间发生垂直耦合, 相对于单层量子点结构, 发光峰明显红移, 同时伴随着发光谱线变窄, 这和 Solomon 等人^[2]的研究结果是一致的. 单层量子点发光谱具有很好的高斯线型, 但多层垂直耦合量子点结构的发光谱却出现明显的高能带尾. 我们用双高斯线型把多层耦合量子点的发光谱拟合得很好, 低能 1.09eV 发光峰的积分强度是高能 1.12eV 发光峰的三倍多. 单层量子点的发光峰是 1.17eV, 谱线半高宽为 52meV. 多层垂直耦合 InAs 量子点发光谱的低能峰相对单层发光红移了近 100meV, 半高宽变为 38meV; 而高能峰相对单层发光只红移 50meV, 半高宽为 50meV. 结合 TEM 照片, 大多数的 InAs 量子串生长完全, 由 20 个量子点组成, 因此我们将强的低能发光峰指认为 20 层量子点完全耦合发光引起的. 较弱的高能发光峰是由于量子串生长不完全造成的, 也就由此产生了高能带尾. 我们首先排除了多层耦合量子点的激发态发光导致高能峰的可能性. 随着激发功率增大, 激发态发光将比基态发光强度增大显著. 从 4mW 到 300mW 改变激发功率, 我们发现低能峰和高能峰发光强度比变化不大. 在 TEM 照片

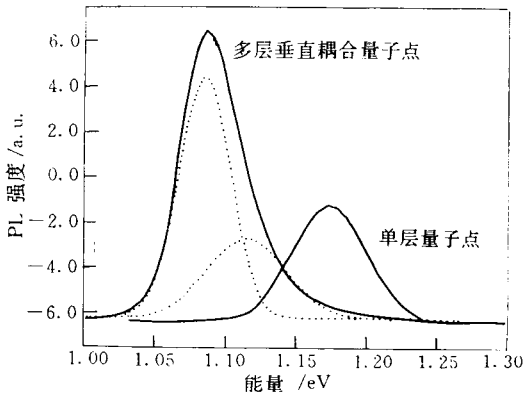
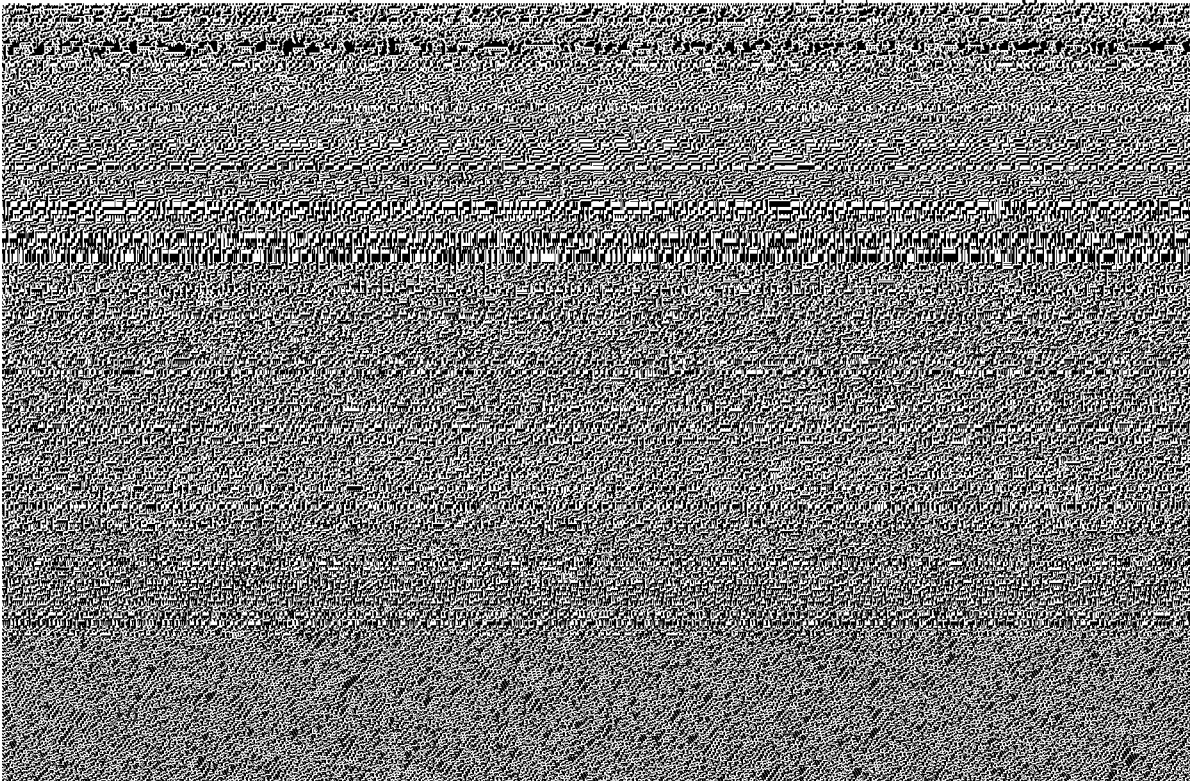


图 3 单层和多层垂直耦合 InAs 量子点的光致发光谱

虚线表示用两个高斯型拟合多层量子点发光谱的结果.

低能发光峰指认为 20 层量子点完全耦合发光引起的. 较弱的高能发光峰是由于量子串生长不完全造成的, 也就由此产生了高能带尾. 我们首先排除了多层耦合量子点的激发态发光导致高能峰的可能性. 随着激发功率增大, 激发态发光将比基态发光强度增大显著. 从 4mW 到 300mW 改变激发功率, 我们发现低能峰和高能峰发光强度比变化不大. 在 TEM 照片



参 考 文 献

- [1] J. Y. Yao, T. G. Andersson *et al.*, J. Appl. Phys., 1991, **69**: 2224~2230.
[2] Qianghua Xia *et al.*, Phys. Rev. Lett., 1995, **75**: 2542~2545.
[3] G. S. Solomon *et al.*, Phys. Rev. Lett., 1996, **76**: 952~955.
[4] G. S. Solomon *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1996, **69**: 1897~1899.
[5] Zh. I. Alferov *et al.*, Semiconductor, 1996, **30**: 194~196.
[6] Q. H. Xie *et al.*, J. Vac. Sci. Technol., 1996, **B13**: 2203~2207.
[7] D. Bimberg *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 1996, **35**: 1311~1319.
[8] 杨小平,等,半导体学报,1996,**17**: 869~872.
[9] J. Tersoff *et al.*, Phys. Rev. Lett., 1996, **76**: 1675~1678.
[10] M. S. Miller *et al.*, J. Appl. Phys., 1996, **80**: 3360~3364.

Vertically Coupled Multilayers of Self-Assembled InAs Quantum Dots

Wang Zhiming, Deng Yuanming, Feng Songlin, Lü Zhendong, Chen Zonghui,
Wang Fenglian, Xu Zhongying and Zheng Houzhi

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

Gao Min, Han Peide and Duan Xiaofeng

(*Laboratory of Electron Microscopy, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Received 16 January 1997, revised manuscript received 20 February 1997

Abstract We investigate the vertically coupled multilayers of self-assembled InAs quantum dots in a GaAs matrix. Transmission electron microscopy shows that quantum dots are vertically aligned in strings and some strings growing turn into one string. Some quantum dot strings' growth is not complete, i. e. these strings compose of less dots than InAs layer number, which is the reason why its photoluminescence spectroscopy has a obvious high energy tail.

PACC: 6885, 6116D, 7855