

InAs 自组织生长量子点 超晶格的电学性质*

陈 枫^{1,2} 封松林¹ 杨锡震² 王志明¹ 赵 谦¹ 温亮生²

(1 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)

(2 北京师范大学物理系 北京 100875)

摘要 我们利用深能级瞬态谱(DLTS)研究了一系列 InAs 自组织生长的量子点超晶格样品, 确认样品中存在体 GaAs 缺陷能级 EL2 和 InAs 量子点电子基态能级, 测得 1.7 和 2.5 原子层 InAs 量子点电子基态能级相对于 GaAs 的导带底分别为 100meV 和 210meV, 量子点电子基态的俘获势垒分别为 0.48eV 和 0.30eV.

PACC: 0750, 7320

1 引言

在 GaAs 衬底上自组织生长的 InAs 量子点材料, 有非常高的发光效率, 在低维物理特性研究方面具有重要意义, 并具有潜在的应用前景. 当前报道最多的是利用光学方法研究量子点的发光特性和生长机理及其微观结构. 多个研究小组在量子点的生长机理、材料性质、物理研究等方面发表了一些理论和实验的文章, 在某些方面取得共识^[1-3]. 国外有一个研究小组报道用 InAs 自组织生长量子点做成激光器原型器件^[4]. 光学 PL 谱可测量量子点的发光特性, 但一般给出的是电子空穴跃迁能量. 由于量子点波函数的空间局域性, 其对载流子的发射和俘获行为, 与深中心会有类似之处; 基于这一考虑, 利用深能级瞬态谱(DLTS)测量量子点的载流子的激活能^[5]和俘获势垒, 可以直接得到量子点的能级, 结合多声子弛豫理论, 对量子点的大小, 应力和密度等可得到定性或定量的结论. 同时又可测量体材料的缺陷和与位错有关的能级, 给出样品的能级分布和量子点的均匀程度等若干信息.

2 实验和讨论

样品是用 V80HMK-II 分子束外延(MBE)系统生长的, 先在 n^+ -GaAs 衬底上生长

* 国家攀登计划和国家自然科学基金资助项目(编号: 69576032)

陈 枫 男, 1975 年出生, 硕士, 现从事量子点超晶格样品的电学性质的研究

封松林 男, 1964 年出生, 研究员, 现从事低维半导体物理性质的研究

杨锡震 男, 1939 年出生, 副教授, 现从事低维半导体物理性质和材料生长的研究

1997-04-24 收到, 1997-07-15 定稿

1 μm 的 n^+ -GaAs 缓冲层; 然后在 450 $^{\circ}\text{C}$, 周期性交替生长 10nm 的 GaAs 和几原子层厚的 InAs, 共生长 10 个周期后, 再覆盖 50nm 的 GaAs 间隔层; 这样的 10 周期 InAs/GaAs 量子点及 50nm GaAs 间隔层重复 5 次 最后再覆盖 150nm 的 GaAs 盖层 三组样品的 InAs 层厚度分别为 0.5ML, 1.7ML, 2.5ML; 整个样品为 n 型 Si 均匀掺杂, 其中 0.5ML 样品的掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 其它样品掺杂浓度约为 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. 其余的生长条件在参考文献 [6] 中提到 我们设计该样品有两个目的, 一是为了提高量子点的密度, 增加信号强度; 二是利用 50nm 的 GaAs 间隔层来终止纵向自组织和应力, 降低由应力产生的位错密度, 提高样品质量

测量仪器是匈牙利 SEM ITRAP 公司的 DL S-82E 深能级瞬态谱仪, 采用双锁相放大技术给出 DLTS 信号. 对四组样品在反向偏压为 -0.5V (0.5ML 样品的反向偏压为 -1.5V),

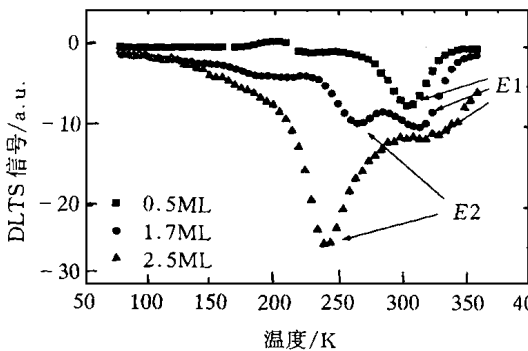


图 1 三组样品的 DLTS 谱

填充脉冲偏压为 0V, 频率为 5.02HZ, 填充脉宽为 5ms 下测得 DLTS-温度曲线 (图 1). 从图中可以看出, 三组样品都有能级 E1, 有量子点的样品 (1.7ML 样品和 2.5ML 样品) [6] 有能级 E2 对于 0.5ML 的样品, 由于掺杂较高, 从电容计算测量的活性区在最表层的 GaAs 盖层内, 因此能级 E1 与 InAs 层无关, 是体 GaAs 缺陷的能级 由于各样品具有相同的结构和生长条件, 结合各能级的位置来看, 初步可确认三组样品的 E1 能级是体 GaAs 缺陷的能级 EL2; 有量子点样品的能级

E2 是量子点的能级 下面对不同样品的各个能级具体测量和分析

2.1 量子点能级的展宽

在 DLTS 测量中, 对于某个深能级 E, 通常使用 (1)、(2) 式

$$e_n = A T^2 \exp(-E_n/kT) \quad (1)$$

$$S(e_n) = \Delta C \left(\int_{T/4}^{T/2} \exp(-t/e_n) dt - \int_{3T/4}^T \exp(-t/e_n) dt \right) \quad (2)$$

来描述与温度 (T) 有关的载流子发射率 (e_n) 和随发射率变化的 DLTS 信号 ($S(e_n)$). (1) 中 $A = (gN_c c_{0n} v / (1/T^2))$ 为一与温度无关的参数; E_n 为深能级的载流子激活能 (2) 中积分项的上下限中的 T 为锁相放大器的频率的倒数; ΔC 为瞬态的起始与稳态的电容差值

由 0.5ML 和 1.7ML 的样品能级 E1 和 E2 的 $\ln(e_n^t/T^2) - 1000/T$ 图得到两个样品的能级参数: $E_{1n}(0.5ML) = 0.68\text{eV}$, $A_1(0.5ML) = \exp(15.69)$; $E_{1n}(1.7ML) = 0.75\text{eV}$, $A_1(1.7ML) = \exp(19.37)$; $E_{2n}(1.7ML) = 0.58\text{eV}$, $A_2(1.7ML) = \exp(16.82)$. 利用这些参数结合深能级的测量公式 (1, 2), 拟合这两个样品的 DLTS-温度曲线

从拟合结果 (图 2(a)) 可以看出 0.5ML 样品能级 E1 对应的 DLTS 峰的实验和拟合曲线符合较好. 由此可以确定这个能级是单一的. 1.7ML 样品的能级 E1 和能级 E2 对应的峰由 (1, 2) 式拟合 (图 2(b)), 拟合的曲线比测量曲线要窄得多, 说明能级有较大的展宽. 一种可能的解释是: 由于量子点的大小不均匀使得量子点的能级分布存在展宽; InAs 层量子点的应力使其上的 GaAs 层也存在应力 [7], 从而使体 GaAs 的缺陷发生畸变, 使其能级有微小

改变, 并且由于 GaAs 层应力分布的不均匀使缺陷能级分布加宽 假定(2)中的 ΔC 随能级

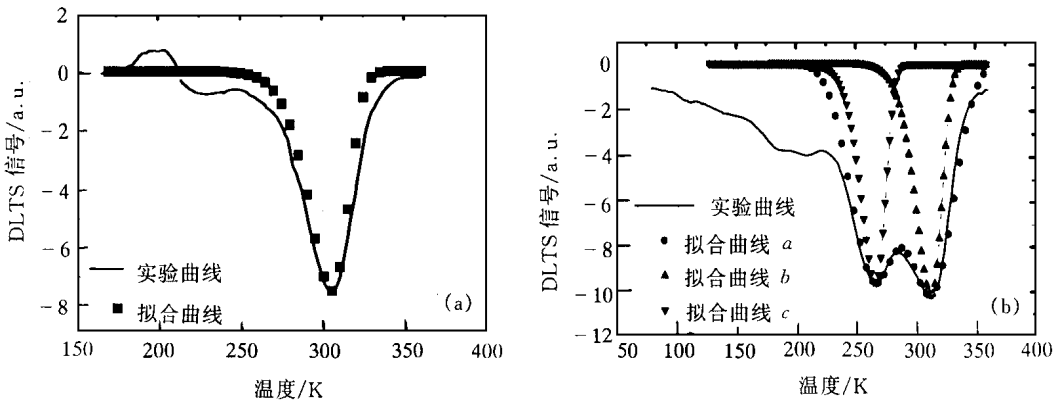


图 2 0.5ML (图 a)和 1.7ML (图 b)样品的DLTS 实验曲线(线)和拟合曲线(点) 在图 b 中, b(c)是不考虑能级展宽能级 $E_1(E_2)$ 的拟合曲线; a 是考虑能级分布展宽后 E_1 和 E_2 的拟合曲线

成 Gauss 型分布, 能级半宽为 ΔE , 电容瞬态为非指数, 深能级 DLTS-温度曲线由公式(3, 4, 5)给出

$$\Delta C(E) = A \exp[-(E - E_n)^2 / \Delta E_n^2] \tag{3}$$

$$e_n(E) = T^2 [gN c \sigma_n v (1/T^2) \exp(-E/kT)] \tag{4}$$

$$S(\tau) = \int_0^{\tau/4} dE \Delta C(E) [\int_{T/4}^{\tau/2} \exp(-t/e_n) dt - \int_{3\tau/4}^{\tau} \exp(-t/e_n) dt] \tag{5}$$

对 1.7ML 样品利用上式拟合 DLTS 曲线, 当 $\Delta E_{1n}(1.7ML) = 0.06\text{eV}$, $\Delta E_{2n}(1.7ML) = 0.07\text{eV}$ 时, 拟合曲线与实验曲线非常符合, 如(图 2(b))所示 我们对 2.5ML 的样品做同样的测量和分析, 得到能级 E_1, E_2 的展宽 $\Delta E_{1n}(2.5ML)$ 为 0.14eV , $\Delta E_{2n}(2.5ML)$ 为 0.07eV . 对于量子点样品来说, InAs 层厚度不同时, 量子点尺寸分布的展宽变化是不大的, 所以量子点能级分布的展宽变化也不大; 但随着量子点变大, 量子点的应力也变大, GaAs 层的应力分布也更不均匀, 因此 2.5ML 样品的 E_1 能级分布的展宽大于 1.7ML 样品

2.2 两种尺寸的量子点的比较

对 1.7ML 的样品和 2.5ML 的样品 2.5ML-1 做不同频率下的温度扫描谱, 测得各自的 E_2 能级的参数: $E_{2n}(1.7ML) = 0.58\text{eV}$, $A(1.7ML) = \exp(16.82)$; $E_{2n}(2.5ML) = 0.51\text{eV}$, $A(2.5ML) = \exp(17.23)$. 在发射率与温度的函数(式 1)中, 指数因子 $E_n = E_{\tau} + E_{\sigma}$, E_{τ} 是深能级到 GaAs 导带底的能级差, E_{σ} 是深能级的俘获势垒值 当量子点俘获电子是个多声子弛豫过程时, 存在俘获势垒 E_{σ} , 它的俘获截面与温度的倒数和俘获势垒的乘积呈指数关系 我们对 1.7ML 和 2.5ML 的样品做了更进一步的测量, 在不同频率下测得不同温度的俘获截面, 发现俘获截面确是热激活的^[8], 各自的俘获势垒为 $E_{2\sigma}(1.7ML) = 0.48\text{eV}$, $E_{2\sigma}(2.5ML) = 0.30\text{eV}$. 从量子点的大小来看, 1.7ML 刚刚形成量子点, 量子点的体积小, 形成的束缚能级较高, 离 GaAs 导带的能距($E_{2\tau}$)较小; 而 2.5ML 的样品形成的量子点较大, 束缚能级低, 离 GaAs 导带的能距($E_{2\tau}$)较大, 这与测量结果(表 1: $E_{2\tau}$)是相符合的

利用多声子弛豫模型可以给测得的量子点能级的实验结果一个定性的解释 将量子点

中的电子和其周围的原子看成一个系统,量子点的位形图如图 3

表 1 三个样品的各个能级列表

样品编号	E_{1n}/eV	E_{2n}/eV	E_{2o}/eV	E_{2T}/eV
0.5ML	0.69			
1.7ML	0.75	0.58	0.48	0.10
2.5ML-1	0.80	0.51	0.30	0.21

纵坐标是系统的晶格弛豫能和电子的荷电能之和;横坐标是原子的位形,表示晶格弛豫的强弱.每条曲线分别对应着系统处在不同状态时的总能量.系统能量由(6)式描述:

$$E = K(Q - Q_0)^2/2 - E_T \tag{6}$$

系数 K 是一个与原子间耦合强弱有关的量,它的大小决定能量曲线的曲率. Q_0 是能量极小值对应的位形,它的大小反映了晶格畸变强弱.样品 2.5ML 的能级 E_1 展宽 ΔE_{1n} (2.5ML)

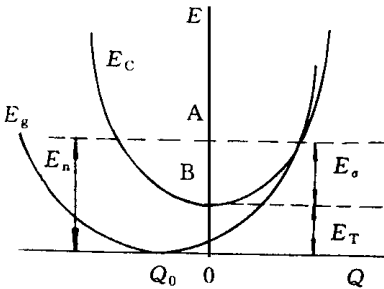


图 3 量子点的位形示意图

大,对应着 InAs 层量子点的应力大于 1.7ML 的样品;当 InAs 层的量子点的应力大,晶格位形的畸变大,束缚电子与晶格耦合产生的畸变也更强,对应的 Q_0 也越大;同时晶格原子之间的耦合也更强,(6)中样品 2.5ML 的能级 E_2 对应的 K 值大于 1.7ML 的样品的 E_2 对应的 K 值.从图 3 中可以看出,在某些范围内, $|Q_0|$ 增大,俘获势垒减小; K 增大,俘获势垒也减小.因此量子点变大时俘获势垒是有可能变小的,这就解释了我们测得量子点越大其电子热激活能反而下降的现象.

2.3 其他能级

从样品 2.5ML 的 DLTS 谱(图 4)可以看出在能级 E_1 和 E_2 的 DLTS 峰之间有一肩形,意味着还有一个低密度的能级.用 E_1, E_2 的能级参数结合(5)式拟合 DLTS-温度曲线,取 $\Delta E_{2n} = 0.07\text{eV}$, $\Delta E_{1n} = 0.14\text{eV}$ 时,拟合得到的能级 E_1 和 E_2 的 DLTS 峰,它们与实测曲线之差得到了中间的小峰,称之为对应的能级为 E' .一种可能的解释是:在量子点的生长过程中,量子点并不是连续变大,而有可能是更易生成某些大小点.1.7ML 样品的 DLTS-温度曲线的低温部分有多个小峰也表明,其并非是一个展宽的能级的 DLTS 峰,而是由多个能级形成的.

样品 2.5ML 的实验 DLTS-温度曲线在低温部分比能级 E_2 (2.5ML) 的拟合曲线要宽且高些,有可能是量子点的不均匀或有关位错的能级产生.

3 结论

我们成功地用深能级电容瞬态谱(DLTS)研究了量子点的电学特性,该方法虽比不上光学测量方法精确,但这种方法直观可行,不依赖于理论模型直接给出量子点的电学参数,并且测量范围较大,还可以得出体内的深能级包括位错的分布,密度等,这是光学不易做到的.2.5ML 样品的量子点的俘获势垒比 1.7ML 样品的量子点的俘获势垒要小.由于应力和量子点大小的不均匀使得量子点的能级和体 GaAs 的能级有一定的展宽.

参 考 文 献

- [1] M. A. Cusack, P. R. Briddon and M. Jaros, *Physical Review*, 1996, **B54**: 2300
- [2] M. Grundmann, N. Ledentsov, O. Stier, D. Bimberg *et al.*, *Appl Phys Lett*, 1996, **68**: 979
- [3] P. N. Brunkov, S. G. Konnikov, V. M. Ustinov *et al.*, *Semiconductors*, 1996, **30**: 492
- [4] D. Bimberg, N. N. Ledentsov, M. Grundmann *et al.*, *Jpn. J. Appl Phys*, 1996, **35**: 1311
- [5] S. Anand, N. Carlsson, M-E Pistol *et al.*, *Appl Phys Lett*, 1996, **67**: 3016
- [6] 杨小平, 张伟, 陈宗圭, 等, *半导体学报*, 1996, **17**(11): 869
- [7] Qianghua Xie, P. Chen, A. Madhukar, *Appl Phys Lett*, 1996, **65**(16): 2051
- [8] 陈枫, 封松林, 杨锡震, 等, *红外与毫米波学报*, 1997, **16**(8): 241

Electronic Property of Self-Organized Grown InAs Quantum Dots Superlattice

Chen Feng^{1,2}, Feng Songlin¹, Yang Xizhen², Wang Zhiming¹,
Zhao Qian¹, Wen Liangsheng²

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

(*Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Received 24 April 1997, revised manuscript received 15 July 1997

Abstract Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) has been successfully applied to characterize the electronic property of self-organized grown InAs quantum dots. The energies of ground state of 2.5ML and 1.7ML InAs quantum dots with respect to the conduction band of bulk GaAs are about 0.21 eV and 0.10 eV, respectively, and the capture barrier energies of these dots for electron are about 0.30 eV and 0.48 eV, respectively.

PACC: 0750, 7320