

97,16(4) 241-244 241-520

1997/15821A/0/6/204

# InAs 自组织生长量子点的电子俘获势垒\* TN304.23

陈枫<sup>1,2)</sup> 封松林<sup>1)</sup> 杨锡震<sup>2)</sup> 王志明<sup>1)</sup> 汪辉<sup>1)</sup> 邓元明<sup>1)</sup> TN340.2

<sup>1)</sup>中国科学院半导体所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京, 100083;

<sup>2)</sup>北京师范大学物理系, 北京, 100875)

0471.1

**摘要** 成功地用深能级瞬态谱(DLTS)研究了InAs自组织生长的量子点电学性质, 获得2.5原子层InAs量子点电子基态能级在GaAs导带底下约0.13eV, 该量子点在荷电状态发生变化时伴随有晶格弛豫, 对应俘获势垒为0.32eV. 本工作也证明可以把量子点类比深中心进行研究.

**关键词** 量子点, DLTS, 自组织生长, InAs/GaAs

砷化铟 电子俘获势垒

## 引言

InAs 自组织生长量子点由于其在新型器件上的应用前景及在低维物理和材料生长等研究中的重要地位, 近年来成为半导体学科的一个热点. 在量子点的生长机理、材料性质、物理研究等方面已发表了一些理论和实验文章, 在一些方面取得共识<sup>[1~3]</sup>, 国外报道了用InAs 自组织生长量子点做成激光器原型器件<sup>[4]</sup>. 目前, 一般认为S-K模式生长出的InAs/GaAs量子点可以看成是一个尺度在100Å量级的原子团. 理论分析表明, 由于量子约束效应, 量子点内有一个或多个束缚的电子能态和多个束缚的空穴能态<sup>[1]</sup>. 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有类似之处, 基于这一考虑, 我们认为可以利用深能级瞬态谱(DLTS)测量量子点发射和俘获电子的过程. 在我们开展本文研究工作后, 国外已有用DLTS测量单层InP量子点激活能的报道<sup>[5]</sup>, 对我们的想法给予旁证, 但目前尚未见有关测量量子点俘获势垒和InAs量子点激活能的报道. 本文采用特殊设计的多层InAs自组织生长量子点样品, 用DLTS研究了InAs量子点的俘获势垒和激活能.

## 1 实验和讨论

样品用V80HMK-I分子束外延(MBE)系统生长, 先在n<sup>+</sup>-GaAs衬底上生长1μm的n<sup>+</sup>-GaAs缓冲层, 而后周期生长100Å GaAs和2.5原子层的InAs, 共生长10个周期后, 再覆盖500Å的GaAs. 10周期InAs/GaAs量子点及500Å GaAs覆盖层重复5次, 最后再覆盖1500Å的GaAs顶层, 样品结构见图1. 整个样品为n型Si均匀掺杂, 浓度约为3×10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>. 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DLTS信号强度; 二是利用500Å的GaAs隔断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.

基于引言中提出的设想, 量子点如同深中心一样, 其电子发射几率 $e_e$ 应是热激活的, 通

\*国家攀登计划和国家自然科学基金(编号:6957632)资助项目  
本文1997年3月4日收到, 修改稿1997年4月21日收到

过与深中心的类比可知量子点的电子发射几率和激活能  $E_n$  的关系可写为

$$e_n = A \cdot T^2 \cdot \exp(-E_n/KT), \tag{1}$$

其中  $K$  为玻尔兹曼常数,  $A$  是与温度无关的常数.

为获得较好的 DLTS 信号,使样品处在较好的反向特性区内,取测量反向偏压  $V_R$  为 1V,填充脉冲电压  $V_F$  为 0,测量时的活性区有 1000Å 以上,能包括 5 层量子点.取电子填充脉冲宽度  $t_F = 1\text{ms}$ ,改变率窗  $t_R$  从 3.31 到 331ms,测量结果见图 2.由 Arrhenius 图拟合得到量子点的电子激活能  $E_n = 0.45 \pm 0.01\text{eV}$ .

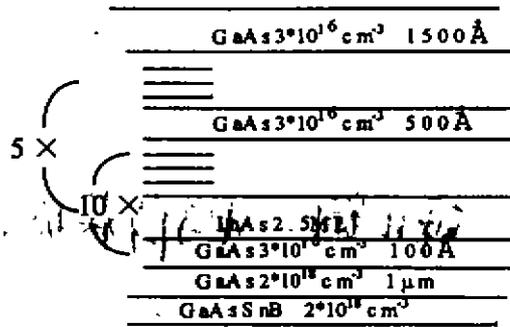


图 1 样品结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the sample

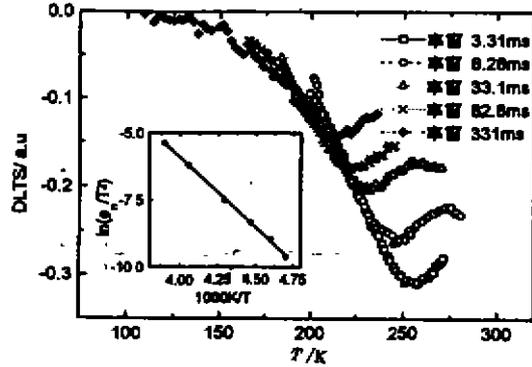


图 2 随率窗变化的 DLTS 谱(左下角的插图为  $\ln(e_n/T^2) - 1/T$  的实验曲线(点)和拟合曲线(直线)图,  $e_n$  为电子发射率)  
Fig. 2 The DLTS curves at different rate windows, the  $\ln(e_n/T^2) - 1/T$  experimental curve (dots) and simulated curve (line) are shown (inserted),  $e_n$  is the emission rate of electrons

在多声子俘获范畴内,通常缺陷的俘获截面  $\sigma_n$  是热激活的,由指数因子可求得俘获势垒  $E_n$ ,因而量子点俘获截面可表示为

$$\sigma_n(T) = \sigma_n(\infty) \exp(-E_n/KT), \tag{2}$$

忽略库仑作用能,由  $E_n$  及  $E_c$  可求得量子点电子态的能级位置为

$$E_T = E_n - E_c. \tag{3}$$

当存在俘获势垒时,DLTS 谱的峰值与电子填充脉冲宽度  $t_F$  呈指数关系,指数因子为量子点的俘获系数  $C_n$  与载流子浓度  $n$  的乘积,即

$$S(t_F) = S(0) + S(\infty) \cdot \exp(-C_n n \cdot t_F), \tag{4}$$

其中  $S(t_F)$  为测量的 DLTS 谱峰值,  $S(0)$  为 DLTS 谱的本底,  $S(\infty)$  为量子点被电子全部填充时的 DLTS 谱的峰值,由图 3 拟合得到  $S(0)$ 、 $S(\infty)$  和  $C_n n$ . 取率窗  $t_R = 82.8\text{ms}$ ,  $V_R = -1\text{V}$ ,  $V_F = 0\text{V}$ ,电子填充脉冲宽度  $t_F$  从 0.05ms 到 30ms,测量结果见图 3.由图 3 曲线拟合得到  $S(0) = -0.7629(\text{a.u.})$ ,  $S(\infty) = -0.8231(\text{a.u.})$ ,  $C_n n = 173.7\text{s}^{-1}$ ,可求得  $\sigma_n = 6.64 \times 10^{-22} \text{cm}^{-2}$ .

改变率窗,利用不同的率窗测量不同温度下的俘获系数,计算出相对应的俘获截面,测得俘获截面随温度变化,拟合实验结果表明俘获截面是温度倒数的指数关系,验证了式(2),

测量和拟合结果如图 4. 根据式(2)和曲线拟合结果得到电子的俘获势垒  $E_c = 0.32 \pm 0.05$  eV,  $\sigma_n = 4.35 \times 10^{-15} \text{cm}^{-2}$ .

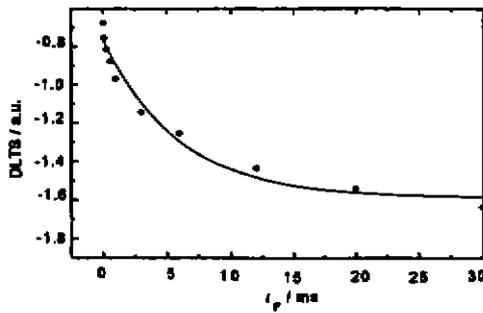


图 3 DLTS 峰值随填充脉冲宽度的变化  
(填充脉冲宽度  $t_p$  取值为 0.05、0.1、  
0.6、1、3、6、12、20、30ms)

Fig. 3 The DLTS peak magnitudes at various filling pulse widths which are 0.05, 0.1, 0.6, 1, 3, 6, 12, 20, 30ms

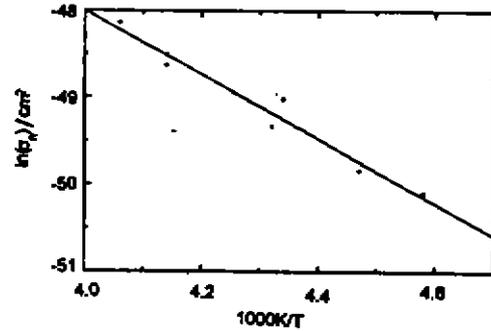


图 4 随温度变化的电子的俘获截面  
(直线斜率为电子的俘获势垒  $E_c$ ,  
率窗取值范围 8.28~165.6ms)

Fig. 4 The capture cross-section curve at various temperatures (the rate windows vary from 8.28ms to 165.6ms)

由 PL 谱得知,量子点的电子基态到空穴  $|000\rangle$  态的能级差为  $1.182\text{eV}^{[6]}$ ,电激活能和光激活能存在很大差别也说明俘获势垒的存在.量子点的电子处在不同的能态时,电子云的分布不同,从而使周围晶格的应变发生变化,导致周围晶格位形发生变化.量子点的位形如图 5,纵坐标是系统能量  $E$ ,横坐标是周围原子的位置  $Q$ ,图中,两条曲线对应与电子处于导带  $E_c$  和束缚态  $E_r$  时的随原子位形改变的系统能量,电子处在不同状态时系统能量最小值对应的原子位形是不同的.从图 5 可看出电子在激发态与束缚态之间的跃迁是热激活的,与势垒高度和温度有关,图中电子激活势垒为  $E_a$ ,电子俘获势垒为  $E_c$ ,激活或俘获电子时的能量差由多个声子的吸收或发射来补偿.在量子力学理论中,由于晶格弛豫的存在,在无辐射多声子弛豫过程中,俘获截面和温度倒数与俘获势垒的乘积呈指数关系,如式(2).我们实测结果符合该多声子弛豫理论,因而可以用多声子俘获机理解释我们的实验结果.

理论计算表明,InAs 量子点的重空穴基态能级到 GaAs 价带顶的能隙为  $0.22\text{eV}^{[1]}$ ,由 PL 谱结果<sup>[6]</sup>推算量子点电子基态能级到导带底的能隙应为  $0.117\text{eV}$ .由理论计算底直径为  $120\text{\AA}$  是塔形量子点的电子基态能级到导带底的能隙为  $0.16\text{eV}^{[1]}$ .由式(3)可得到量子点电子基态能级到 GaAs 导带底距离为  $E_r = E_a - E_c = 0.45 - 0.32 = 0.13\text{eV}$ .这表明我们的测量结果与光学测量和理论结果在误差范围内一致,能带示意图见图 6.

## 2 结论

我们用 DLTS 研究了 InAs 自组织生长的量子点的发射和俘获载流子过程,表明此量子点在发射和俘获载流子的过程中存在较大的晶格弛豫,即存在较大的俘获势垒,这一行为可以在无辐射多声子弛豫过程的范畴内给予解释.我们还通过这项研究给出一种直接测量量子点电子或空穴基态能级位置的方法,虽然不如光学方法精确,但可以不依赖任何理论模型给出基态能级位置,其结果在误差范围内与理论和光学测量结果一致.

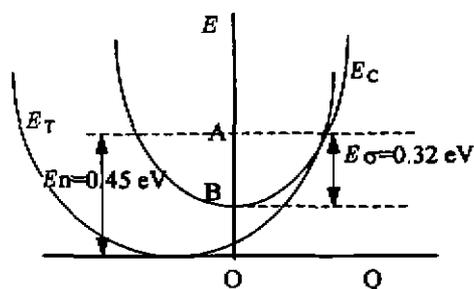


图5 量子点位形图

Fig. 5 Coordinate of configuration of QD

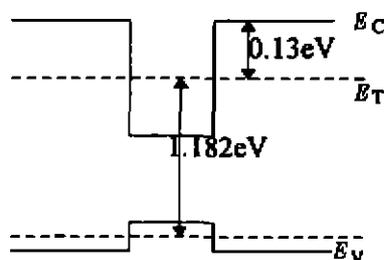


图6 量子点能带示意图

Fig. 6 Schematic diagram of QD's energy band

## 参考文献

- 1 Cusack M A, Briddon P R, Jaros M. *Physical Review B*, 1996, **54**:2300
- 2 Grundmann M, Nledentsov N, Stier O, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**:979
- 3 Brunkov P N, Konnikov S G, Ustinov V M. et al. *Semiconductors*, 1996, **30**:492
- 4 Bimberg D, Ledentsov N N, Grundmann M, et al. *Jpn. J. Appl. phys.*, 1996, **35**:1311
- 5 Anand S, Carlsson N, Pistol M E, 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**:869

## ELECTRON CAPTURE BARRIER OF SELF-ORGANIZED InAs QUANTUM DOTS\*

Chen Feng<sup>1,2)</sup> Feng Songlin<sup>1)</sup> Yang Xizhen<sup>2)</sup>  
Wang Zhiming<sup>1)</sup> Wang Hui<sup>1)</sup> Deng Yuanming<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>National Laboratory for superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; <sup>2)</sup>Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** Deep level transient spectroscopy (DLTS) was applied successfully to characterize the electric properties of self-organized InAs quantum dots. The energy of the ground state of 2.5 ML InAs quantum dots was obtained at about 0.13 eV below the bottom of the conduction band of bulk GaAs, and there occurred the lattice relaxation associated with the change of charge state of quantum dots. The corresponding capture barrier energy of such dots for electrons is about 0.32 eV. This work shows that the electric characteristics of quantum dots behave somewhat like deep centers and can be investigated by using deep level investigation methods.

**Key words** quantum dots, DLTS, self-organized, InAs/GaAs.

\* The project supported by the Climbing Project and National Natural Science Foundation of China