

①①

# InAs 自组织生长量子点的空穴俘获势垒\*

王海龙 朱海军 宁东 陈枫 封松林

(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)

3  
TN304.2  
O471.1

**摘要** 成功地用深能级瞬态谱(DLTS)研究了p型InAs自组织生长的量子点的电学性质,测得2.5原子层InAs量子点空穴基态能级在GaAs价带底上约0.09eV,该量子点在荷电状态发生变化时需要克服一个势垒,俘获势垒高度为0.26eV,本工作首次利用DLTS测定了量子点空穴的基态能级和俘获势垒,相信对增加量子点性质的理解会起到有益的帮助。

**关键词** 深能级瞬态谱(DLTS), 自组织生长量子点, InAs/GaAs.

空穴俘获势垒

## 引言

DLTS 砷化镓

目前量子点结构及相关器件的研究已受到广泛重视,InAs自组织生长量子点由于其在新型器件上的应用前景以及在低维物理和材料生长等研究中的重要地位,是其中的一个研究热点,多个研究小组在量子点的生长机理、材料性质、物理研究等方面已经发表许多理论和实验的文章<sup>[1-4]</sup>,取得了一些共识,理论分析表明由于量子约束效应,量子点内有一个电子能级和多个空穴能级<sup>[1]</sup>.通常将量子点的能谱与电子态主要由显微技术、光致发光谱(PL)和光致发光激发谱结合研究,量子点样品PL谱中的长波发光被归结为量子点发光,电容谱也已经作为一种对量子点样品进行研究的有力手段<sup>[5-7]</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,与深中心会有类似之处;基于这一考虑,我们利用深能级瞬态谱(DLTS)测量量子点发射和俘获电子或空穴的过程,并已成功用深能级瞬态谱(DLTS)研究了n型InAs/GaAs系统中自组织生长量子点超晶格的电学性质,测定了量子点的电子能级和俘获势垒<sup>[8,9]</sup>.国外也有一个用DLTS测量单层InP量子点的激活能工作<sup>[10]</sup>,但目前我们尚未看到有关测量p型InAs量子点对空穴的俘获势垒和激活能的报导.本文采用特殊设计的多层p型InAs自组织生长量子点样品,用DLTS技术研究了InAs量子点的俘获势垒和激活能.用深能级瞬态谱研究量子点的电学性质是对量子点光学研究的一个补充,同时也是量子点电学应用研究中必不可少的部分.

## 1 实验

### 1.1 样品制备

样品用V80H MK- I分子束外延(MBE)系统生长.在MBE生长过程中,n<sup>+</sup>-GaAs衬底580℃脱氧后,生长1μm的n<sup>+</sup>-GaAs缓冲层,缓冲层掺Si,浓度为2×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>.样品的生长顺序是:在生长缓冲层后,周期生长10nm的GaAs和n个单原子层(ML)的InAs,共生

\* 国家攀登计划和国家自然科学基金(编号:67996016)资助项目  
稿件收到日期1998-09-29,修改稿收到日期1998-12-14

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 间隔层作为一个结构单元重复 5 次;最后再覆盖 150nm 的 GaAs 盖层,整个结构为 p 型结构掺 Be,浓度约为  $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ,最上面 50nm GaAs 盖层浓度约为  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ . InAs 层的厚度分别为 0.5ML 和 2.5ML. 由 RHEED 监控知道当 InAs 层厚度为 0.5ML 时, RHEED 图案为条状;当 InAs 层厚为 2.5ML 时, RHEED 图案为点状,说明此时形成了量子点. 由该方法生长的样品为 p-n 结结构,样品下表面为 n 型,蒸一层金镍形成欧姆接触,上表面为 p 型,蒸直径为 0.5mm 金银锌形成欧姆接触后,把样品腐蚀  $1 \mu\text{m}$  后形成台面管进行 DLTS 测量. 我们设计该样品有 3 个目的: (1) 提高样品中量子点的密度,增加 DLTS 信号强度; (2) 利用 50nm 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; (3) 直接生长 n-p 结结构,便于进行 DLTS 测量.

## 1.2 测量

用 INNOVANCE AB 型深能级瞬态谱仪进行 DLTS 测量,温度变化范围为 77~360K.

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 各能级激活能的测定

分别对 0.5ML 和 2.5ML 的样品在不同的率窗下进行变温 DLTS 测量. 为获得较好的 DLTS 信号,使样品处在较好的反向特性区内,确定反向偏压 ( $V_R$ ) 为 1V, 填充脉冲电压 ( $V_F$ ) 为 0, 测量时的活性区有 100nm 以上. 取电子填充脉冲宽度  $t_p = 1\text{ms}$ . 改变率窗值从 2.07 到 41.4. 典型的 DLTS 谱如图 1 所示. 改变测量率窗,由测量结果作出 Arrhenius 图,拟合得到 0.5ML 样品中的 H1 的空穴热发射激活能  $E_{H1} = 0.16\text{eV}$ . 2.5ML 样品的 H1 和 H2 空穴热发射激活能分别为  $E_{H1} = 0.20\text{eV}$  和  $E_{H2} = 0.35\text{eV}$ .

### 2.2 量子点能级的指认

由图 1 可知,在 70~300K 温度范围内,样品 0.5ML 只在 160K 附近存在一个信号较弱的 H1 峰,而在形成量子点的 2.5ML 的样品中在 210K 附近有一信号很强的 H2 峰,谱线在低温侧明显展宽,并且在 160K 附近有一明显的肩膀 H1 峰. 如果利用 H1 和 H2 峰的能量

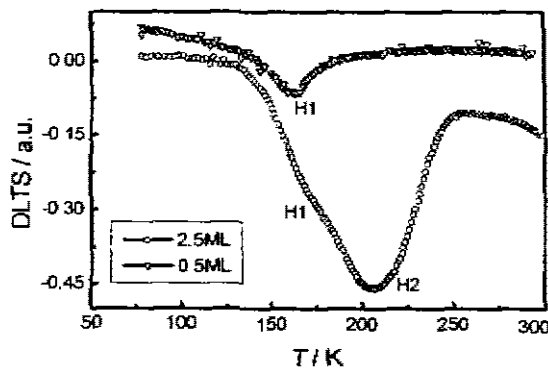


图 1 样品 0.5ML 和 2.5ML 的 DLTS 谱比较  
Fig. 1 Comparison of DLTS curve between  
0.5ML and 2.5ML

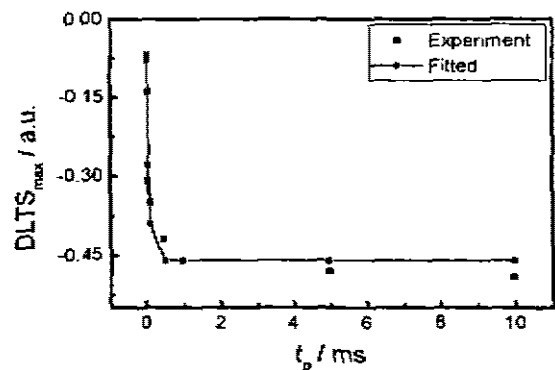


图 2 DLTS 峰高随填充脉冲宽度的变化  
Fig. 2 The DLTS peak magnitude at various  
filling pulse widths

进行拟合将得到与实验非常接近的曲线,这显然是在 2.5ML 的样品中 180K 附近的弱峰 H1 被淹没在 210K 附近的强峰中. 由于样品生长条件和测量条件完全一致,2 种样品的唯一差别在于 2.5ML 的样品形成了量子点,而 0.5ML 的样品没有形成量子点. 因此可以确定 2.5ML 样品中 210K 附近的强 H2 能级是由量子点引起的. 而在 2 种样品中都存在的较弱的 H1 能级可能为样品本身的缺陷而引起的,具体的起因不在本文的讨论范围之内,有待进一步研究. 两个样品的 H1 能级并不完全相同,这可以归结为各个样品中的应力不同造成的.

### 2.3 量子点的空穴俘获参数的测量

量子点行为可以与深中心相类比. 其空穴发射几率  $e_p$  应是温度  $T$  的指数函数,与其激活能  $E_H$  的关系为

$$e_p = A \cdot T^2 \cdot \exp(-E_H/KT). \quad (1)$$

其中  $K$  为玻尔兹曼常数,  $A$  是与温度无关的常数. 在多声子俘获的范畴内,通常缺陷的俘获截面  $\sigma_p$  与温度也有指数关系,由指数因子可求得俘获势垒  $E_a$ ,因而量子点对空穴的俘获截面可表示为

$$\sigma_p = \sigma_p(\infty) \exp(-E_a/KT). \quad (2)$$

忽略库仑作用能后,由  $E_H$  及  $E_a$  可求得量子点空穴态的能级位置为

$$E_t = E_H - E_a. \quad (3)$$

当存在俘获势垒时,DLTS 谱的峰值与空穴填充脉冲宽度  $t_p$  成指数关系,指数因子为量子点的俘获几率  $C_p$  与  $t_p$  的乘积,即

$$S(t_p) = S(0) + S(\infty) * \exp(-C_p \cdot t_p). \quad (4)$$

其中  $S(t_p)$  为测量的 DLTS 谱峰值,  $S(0)$  为 DLTS 谱的本底,  $S(\infty)$  为量子点全部填充空穴时的 DLTS 谱的峰值.  $C_p$  可以表示成

$$C_p = \sigma_p v_p p. \quad (5)$$

其中  $\sigma_p$  为空穴的俘获截面,  $v_p$  是空穴的热运动速度,  $p$  为价带中空穴载流子的浓度. 由测量结果可以看出,在其他条件不变的情况下,DLTS 谱峰值高度随着率窗的改变而发生很大的变化,这说明俘获过程中存在较大的俘获势垒.

为测量俘获势垒,固定率窗值,改变叠加于二极管反向偏压的脉冲宽度  $t_p$ ,记录 DLTS 谱峰值的高度,测量结果见图 2. 利用式(4)拟合实验数据,可以得到  $C_p(T)$ . 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的指数关系,验证了式(2),测量和拟合结果如图 3. 由此得到空穴的俘获势垒  $E_a = 0.26\text{eV}$ .

量子点和空穴的相互作用可以用类似于缺陷的位形图来表示,如图 4,纵坐标是系统能量  $E$ ,横坐标是位形坐标  $Q$ . 图 4 中,两条曲线对应于空穴处于价带  $E_v$  和束缚态  $E_T$  时的系统能量,图中空穴发射热激活势垒为  $E_p$ ,空穴俘获势垒为  $E_c$ . 在解释缺陷的势垒时,由于晶

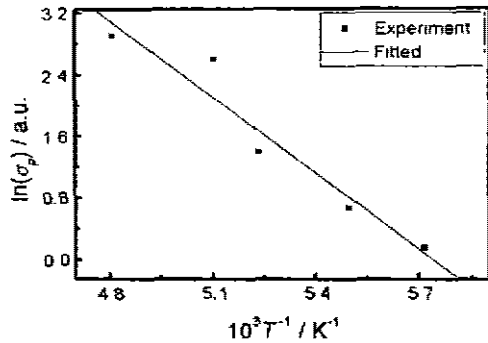


图3 随温度变化的电子的俘获截面  
Fig. 3 The capture cross-section curve at various temperature

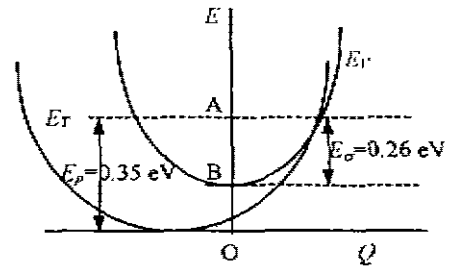


图4 量子点的位形图  
Fig. 4 Coordinate of configuration of QD

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). 我们实验结果符合多声子弛豫理论,但对于量子点俘获势垒的物理解释还有待进一步研究.

### 2.4 量子点的能带示意图

由 PL 谱测量得知量子点的电子基态到空穴 |000> 态的能级差为 1.28eV, GaAs 的带隙为 1.49eV. 实验表明 InAs 量子点的重空穴基态能级到 GaAs 价带顶距离:  $E_r = E_p - E_s = 0.35 - 0.26 = 0.09\text{eV}$ , 在文献 [9] 中我们测得电子基态到导带底的距离为 0.13eV. 利用这些结果我们得到能带示意图, 参见图 5. 这表明我们的测量结果与理论结果在误差范围内是相当一致的.

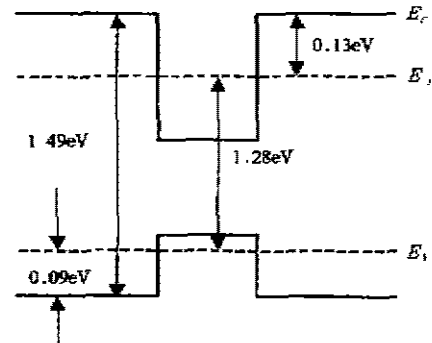


图5 GaAs/InAs 能带不连续示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of GaAs/InAs QD's energy band offset

### 3 结语

我们用 DLTS 研究了 p 型 InAs 自组织生长量子点发射和俘获空穴的过程, 表明此量子点在发射和俘获空穴的过程中有着较大俘获势垒. 这一行为可以有多种可能的解释, 应对其进行进一步的研究, 确定其机理有助于我们对量子点与载流子作用的深入了解. 本文报道了 2.5ML InAs 量子点空穴基态能级位置在价带之上 0.09eV 处, 量子点对空穴的俘获势垒值为 0.26eV. 该方法可以不依赖任何理论模型给出空穴基态能级位置, 其结果在误差范围内与理论和光学测量的相一致.

## REFERENCES

- 1 Cusack M A, Briddon P R, Jaros M. Electronic structure of InAs/GaAs self-assemble quantum, *Phys. Rev. B*, 1996, **54**:2300
- 2 Grundmann M, Nledentsov N, Stier O, *et al.* Excited states in self-organized InAs/GaAs quantum dots; theory and experiment, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**:979
- 3 Brunkov P N, Konnikov S G, Ustinov V M, *et al.* Capacitance spectroscopy of electron energy levels in InAs quantum dots in a GaAs matrix, *Semiconductors*, 1996, **30**:492
- 4 Bimberg D, Ledentsov N N, Grundmann M, *et al.* InAs-GaAs quantum pyramid lasers; In situ growth, radiative lifetimes and polarization properties, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**:1311
- 5 Ashoon R C, Stormer H L, Weiner J S, *et al.* N-electron ground state energies of a quantum dot in magnetic field, *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**:613
- 6 Drexler H, Leonard D, Hansen W, *et al.* Spectroscopy of quantum levels in charge-tunable InGaAs quantum dots, *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**:2252
- 7 Medeiros-Rebeiro G, Leonard D, Petroff P M. Electron and hole energy levels in InAs self-assembled quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**:1767
- 8 CHEN Fen, FENG Song-Lin, YANG Xi-Zheng, *et al.* Electronic property of self-organized grown InAs quantum dots superlattice, *Chinese J. of Semiconductors* (陈枫, 封松林, 杨锡震, 等. InAs 自组织生长量子点超晶格的电学性质, *半导体学报*) 1998, **19**: 401
- 9 CHEN Fen, FENG Song-Lin, YANG Xi-Zheng, *et al.* Electron capture barrier of self-organized InAs quantum dots, *J. Infrared Millim. Waves* (陈枫, 封松林, 杨锡震, 等. InAs 自组织生长量子点的电子俘获势垒, *红外与毫米波学报*), 1997, **16**:241
- 10 Anand S, Carlsson N, Pistol M-E, *et al.* Deep level transient spectroscopy of InP quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **67**: 3016

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

WANG Hai-Long ZHU Hai-Jun NING Dong CHEN Feng FENG Song-Lin

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

**Abstract** Deep level transient spectroscopy (DLTS) technique was successfully applied to characterize the electric properties of p type self-organized InAs quantum dots. The ground state energy and capture barrier energy of hole of quantum dots were measured for the first time. The energy of ground state of 2.5ML InAs quantum dots with respect to the valence band of bulk GaAs was obtained being about 0.09eV, and there was a barrier associated to the change of charge state of quantum dots. The capture barrier energy of such dots for hole was about 0.26eV. The work is very meaningful for further understanding the intrinsic properties of quantum dots.

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

---

\* The project supported by the Climbing Project and National Natural Science Foundation of China  
Received 1998-09-29, revised 1998-12-14