

InAs 自组装量子点 GaAs 肖特基二级管的 电学特性研究^{*}

赵继刚^{1,2)} 邵 彬^{1,2)} 王太宏¹⁾

¹⁾ 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

²⁾ 北京理工大学, 北京 100081)

(2001 年 11 月 28 收到, 2002 年 1 月 22 日收到修改稿)

分析研究了 GaAs/InAs 自组装量子点的电输运性质, 通过对实验数据的分析, 讨论了 Schottky 势垒对 InAs 量子点器件的影响和 $I-V$ 曲线中迟滞回路以及电导曲线中台阶结构产生的原因. 迟滞回路和台阶的出现与电场中量子点的充放电过程相关. 迟滞回路反映了量子点充电后对载流子的库仑作用, 而电导台阶则反映了量子点因共振隧穿的放电现象.

关键词: 迟滞现象, 自组装量子点, 共振隧穿

PACC: 6865, 7340S, 7335C

1. 引 言

InAs 自组装应变量子点的光学和电学性质已经引起人们越来越多的重视. 这种量子点结构完美, 制备方法相对简单, 工艺比较成熟, 且尺寸可以做到 10nm 量级的范围. 量子点体系巨大的吸引力在于其具有“人造原子”的基本性质, 无论在物理基础研究还是应用上都有非常重要的价值. 利用量子点限制效应与库仑荷电效应, 可以获得室温下可操作的单电子晶体管 and 存储器以及高效率的光电子器件. 例如 AlGaAs/GaAs 调制掺杂场效应晶体管 (MODFETs)^[1-3]. 这些优点使 InAs/GaAs 量子点器件成为了一种比较理想的纳米量子器件.

在以 InAs 量子点器件为基础的实验中, 主要研究它的水平输运性质和垂直输运性质. 本文在实验的基础之上, 通过对 Schottky 势垒、量子点充放电、伏安曲线的迟滞回路等现象的研究, 进一步讨论了量子点充放电对 InAs 量子点器件的垂直电学输运特性的影响.

2. 样品的生长和器件的制作

实验所使用的样品是由分子束外延 (MBE) 方法

在 n^+ -GaAs (100) 衬底生长的. 外延生长最初是二维层状生长, 随着外延层厚度的增加产生应变积累, 导致在临界厚度时外延层由层状生长转变为岛状生长, 以便降低系统能量 (岛状结构通过弹性形变释放应力), 形成了纳米量级尺寸均匀的无错位的小岛.

器件截面图如图 1. 具体的制作过程: 1) 在衬底上首先生长 $1\mu\text{m}$ n^+ -GaAs 的缓冲层, 缓冲层的作用是减少衬底表面缺陷, 使 n^+ -GaAs 表面更加理想. 2) 在缓冲层之上加 70nm $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ /GaAs 超晶格势垒, 起到绝缘层的作用. 3) 在超晶格之上, 生长 δ -Si 掺杂层, 其载流子面密度为 $5.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 载流子的密度较大, 形成二维电子气 (2DEG), 起到导电层的作用. 4) 在 δ -Si 掺杂层上加 4nm GaAs 层. 5) 通过外延法生长 InAs 量子点. 6) 在 InAs 量子点之上覆盖 4nm 的 GaAs 盖帽层. 7) 最后用光刻的方法制作 Au 电极^[4-6]. 实验在 77K 的液氮温度下进行.

3. 实验结果和讨论

通过 InAs 量子点器件的结构, 我们可以知道, 通过器件的电流 I 分为三个部分: 通过 GaAs 的电流部分, 由于量子点间的电子隧穿而产生的电流和在 δ -Si 层上通过的电流. 由于 GaAs 和量子点层的电导

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 69925410 和 199904015) 资助的课题.

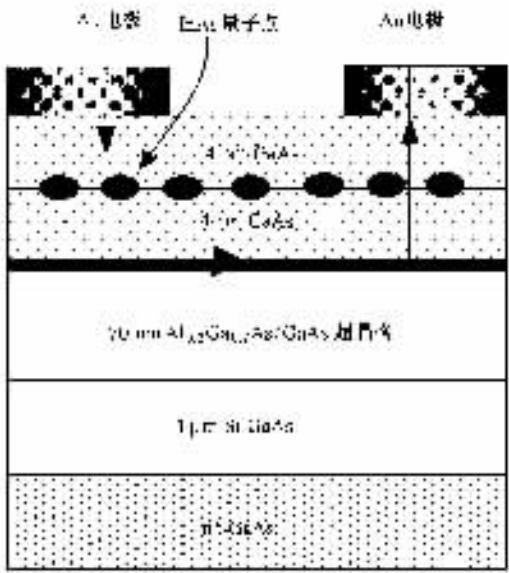


图 1 器件截面原理图

低,所以三个部分中前两项的对系统总电流的贡献很小.而 δ -Si 层的掺杂浓度高,电导较大,由 δ -Si 层通过的电流是器件电流的主要部分.

由于 Au 电极与 GaAs 层接触形成金属 - 半导体 Schottky 势垒,所以器件的性质主要是由 Schottky 势垒的特性所决定的.而量子点充电 - 放电过程对电流的调制作用,造成了 InAs 自组装量子点 Schottky 器件不同于一般 Schottky 器件的性质.

如上分析,可以将器件简化为两个 Schottky 二极管背相连接.在外加电压下,一个处于正偏压状态,另一个处于反偏压状态.根据单载流子近似,流过反向二极管的电流和流过正相二极管的电流是相等的,都等于总的测试电流.因此,整个器件所表现出的特征曲线可以由零点分开,左右相互对称.正负电压下的曲线分别反映了两个 Schottky 二极管的反向特性,如图 2.

为方便讨论,我们将曲线表示成 $\log(I)-V$ 形式,并让图 2(b)中两条电导曲线之间有一个垂直方向上的平移.图 2(a)中的曲线,主要是由于 Schottky 势垒的性质所决定的.如果没有量子点的影响,曲线应重合.但在曲线中出现了明显的迟滞回路,这是由于量子点充电后的库仑阻塞作用和隧穿放电对系统总电流的调制作用造成的.由于量子点放电对系统总电流的影响,图 2(b)中的电导曲线中明显地出现了台阶结构.这是量子点器件特有的特性.下面对此现象进行具体地讨论.

在图 2(b)中如果上下两个曲线没有平移的话,

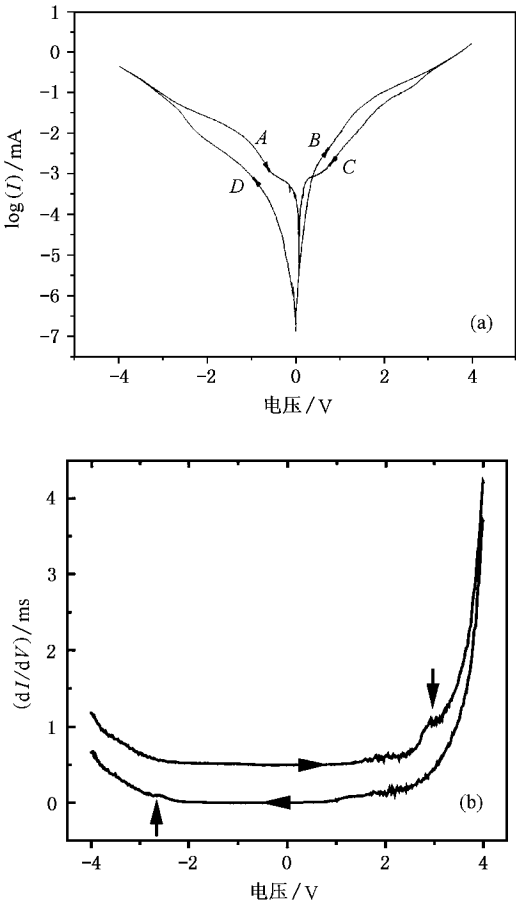


图 2 (a)为 $\log(I)-V$ 特性曲线,(b)为电导-V 特性图

那么除了台阶结构外电导曲线的其他部分都会很好地重合在一起.这进一步说明电导曲线主要反映了 Schottky 二极管的反向特性.为了排除 Schottky 势垒的干扰,更好地看清量子点放电对系统的影响,我们将两条曲线作差,并取绝对值,结果如图 3.图中纵坐标 Y 为两电导曲线的差.

从图中可以看到,曲线由 0 点到 $\pm 4V$ 的过程中,先保持不变,在 $\pm 2.5V$ 附近减小,产生一个低谷,后又突然增大,在 $\pm 3V$ 位置附近出现两个明显的峰值.左侧的尖峰是过程 D 中产生的,右侧的尖峰是过程 B 中产生的.低谷和尖峰说明由于量子点的作用,使电导的值和没有量子点作用时相比较,先减小然后又增大.这个过程的产生是由于充电后的量子点的库仑作用和量子点放电时对总电流的影响.

两个背向的 Schottky 二极管,总是一个处于正相偏压,而另一个处于反向偏压.由于器件的对称性,所以可以只考虑其中一个 Schottky 二极管的行为来讨论量子点的充放电过程.

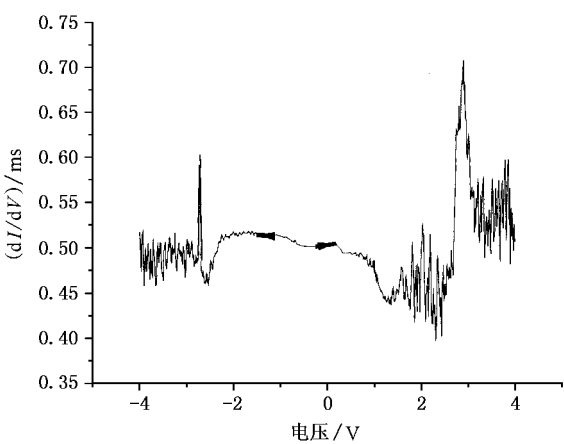


图 3 电导差值曲线

我们以金属电极对量子点的充电过程为例解释量子点充电过程. Schottky 二极管反向相偏压增大, 金属费米能级被抬高, 当金属费米能级与量子点基态能级持平时, 电子会从金属电极中隧穿进入量子点, 即量子点充电. 每当一个电子隧穿进入这个量子点时会使该量子点的静电能增加 $e^2/2c$. 在低温下这个能量有可能大于该电子的热运动能量 kT . 在这种情况下会发生一个崭新的物理效应, 即一旦某一电子隧穿进入一量子点后, 它会对随后而来的第二个电子进入该量子点产生阻挡作用, 只有等到这个电子隧穿出该量子点后, 才允许电子再进入. 这种现象称为库仑阻塞现象^[6]. 库仑阻塞会使 InAs 量子点层的电导下降. 随着偏压的增大, 进入到量子点中的电子数目增多, 对电流的阻碍能力加强, 这就使得电导不断减小.

放电过程与充电过程相反, 当量子点内的电子的基态能级与金属费米能级相同时, 量子点内的电子就会隧穿出量子点. 我们可以用下式解释量子点放电过程. 设量子点中电子电势为

$$\varphi = \frac{Q}{c} + \varphi_{\text{ext}}. \tag{1}$$

它由两部分组成, φ_{ext} 为周围环境给量子点的附加外电势; Q/c 为量子点内电子电荷的自治电势, 其中 c 为量子点的电容, 电荷 Q 只能取电子电荷 e 的整数倍. 量子点的静电势为

$$\begin{aligned} \int_0^{Ne} \varphi(Q) dQ &= \int_0^{Ne} \left(\frac{Q}{c} + \varphi_{\text{ext}} \right) dQ \\ &= \frac{(Ne)^2}{2c} + Ne\varphi_{\text{ext}}. \end{aligned} \tag{2}$$

若用 $U(N)$ 表示量子点中基态的总能量, 则有

$$U(N) = \sum_{l=1}^N E_l + \frac{(Ne)^2}{2c} + Ne\varphi_{\text{ext}}, \tag{3}$$

式中 $\sum E_l$ 为量子点中每个填有电子的三维量子限制能级 E_l 的和^[7,8]. 当量子点内总能量 U 等于外部的费米能级时, 电子就会从量子点中逃逸出来, 产生放电.

充放电过程不仅发生在量子点与金属电极之间, 也发生在量子点与二维电子气之间.

为了更好地解释图 3 中低谷和尖峰的产生原因, 我们考虑一次电压从 $0 \rightarrow +4\text{V}$ 的扫描过程中 Schottky 二极管和量子点的行为. 扫描从 0V 开始, 偏压增大时, 一个 Schottky 二极管处在反偏压状态, 另一个处在正偏压状态. 在两个二极管的偏压作用下, 量子点部分处于充电状态, 部分处于放电状态. 先考虑处于反向偏压下的量子点. 这些量子点在偏压增大时的充放电过程如图 4 所示.

图中 E_F 为金属电极的费米能级, S 为量子点基态能级, 灰色部分为二维电子气 (2DEG).

具体解释如下: 1) 如图 4(a) 所示, 当偏压很小时, 金属电极的费米能级 E_F 低于量子点的基态能量, 此时没有电子进入量子点. 2) 如图 4(b) 所示, 当偏压将金属电极的费米能级抬高至与量子点内基态

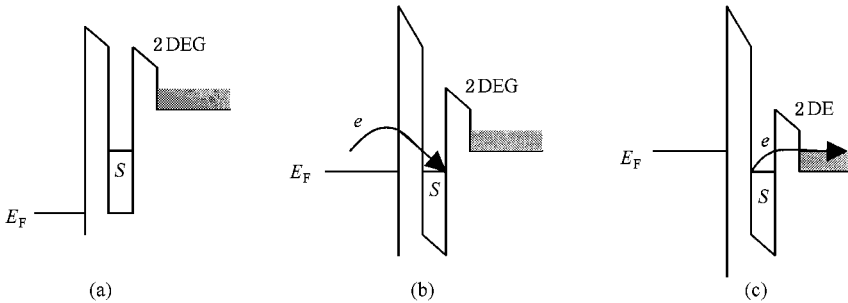


图 4 量子点在偏压增大时的充放电过程

能量相同时,电子通过共振隧穿进入量子点,即量子点充电.同时,量子点内的电子对后面的电子产生库仑阻碍作用,使电导下降,于是出现图3中电导的低谷.^[3]如图4(c)所示,偏压在抬高金属电极的同时,也抬高了量子点内电子的基态能级.当量子点内的电子的基态能级被抬高到与2DEG的能级一致时,量子点内的电子通过共振隧穿进入2DEG中,量子点变为放电的状态,此时在图3的电导曲线中出现峰值.以上是量子点在偏压增大时由放电到充电的过程.同理,在电压从+4V减小的过程中,量子点先是处在对2DEG放电的状态,然后随着电压的降低量子点回到图4(a)状态.

下面考虑在 $0 \rightarrow +4\text{V}$ 偏压增大的过程中,处于正偏压状态的量子点.正偏压下的量子,金属的费米能级被降低,处于放电状态.在电压由+4V减小到0V的过程中,量子点始终处于放电状态,对系统的影响很小.

器件的结构是对称的,因此在偏压从 $0 \rightarrow -4\text{V}$ 增大的过程中,情形和以上的论述是一样的,只是两个Schottky二极管的偏压状态互换.

在这里,只讨论了量子点基态能级放电,而没有考虑量子点中更高的能级,这是因为从图1和图3中,看到量子点只有一次放电过程,所以我们只考虑基态能级的放电是合理的.

综上所述,量子点只是在反向偏压的情况下,同时在偏压增大的过程中出现先充电、后放电的现象,这也就解释了 $I-V$ 曲线中的迟滞回路只在电压增大的过程中产生的原因.

从图3中,还可以看到,在低谷和尖峰附近,曲线有剧烈振荡起伏.而在 $0 \sim \pm 1.5\text{V}$ 的区间内没有这种振荡出现,这样就可以排除振荡是实验设备和测量手段造成的.这一现象可能是由于在数目众多的量子点中,部分量子点尺寸有所差异,造成量子点中基态能级的差异,从而使部分量子点在不同的偏压下放电,形成了电导曲线的振荡.

4. 结 论

我们分析了GaAs/InAs自组装量子点的电流输运性质,讨论了Schottky势垒的影响和 $I-V$ 曲线中迟滞回路以及电导曲线的台阶结构产生的原因.迟滞回路和台阶的出现联系着量子点的充放电过程.迟滞回路反映了量子点充电后对载流子的库仑阻塞作用,而电导台阶则反映了量子点共振隧穿放电现象.通过讨论,可以看出量子点在一定偏压下放电的原因是由于金属费米能级和量子点基态能级相等时发生了共振隧穿,使总电流出现峰值.

[1] Yusa G and Sakaki H 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 345

[2] Kim J W, Lee S H, Oh J E, Lee W S and Chung K W 1999 *Journal of Korean Physical Society* **34** (Suppl. S) 88.

[3] Shields A J, O'Sullivan M P, Farrer I, Ritchie D A, Copper K, Foden C L and Pepper M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 735

[4] Li H W and Wang T H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 74 (in Chinese) [李宏伟、王太宏 2001 物理学报 **50** 74]

[5] Li H W and Wang T H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2039 (in Chinese)

[李宏伟、王太宏 2001 物理学报 **50** 2039]

[6] Li H W and Wang T H 2001 *Appl. Phys. A* **79** 1537

[7] Yu M B, Wang Y et al 1997 *Journal of Xi'an University of Technology* **13** 118 (in Chinese) [余明斌、王燕等 1997 西安理工大学学报 **13** 118]

[8] Zhang S K, Lu F, Jiang Z M and Wang X 1988 *Physic* **27** 643 (in Chinese) [张胜坤等 1998 物理 **27** 643]

The electric properties of GaAs Schottky diode containing InAs self-assembled quantum dots^{*}

Zhao Ji-Gang^{1 2)} Shao Bin^{1 2)} Wang Tai-Hong¹⁾

¹⁾ *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

²⁾ *Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

(Received 28 November 2001 ; revised manuscript received 22 January 2002)

Abstract

The properties of current transport in InAs/GaAs self-assembled quantum dots and the influence of schottky diode are investigated. Hystereses and steps contact with charging and discharging of electrons in the quantum dots. Hystereses are arising from the charged quantum dots that block electrons. All the steps are arising from that the electrons resonant tunnel out of the quantum dots. The electrons that come out of quantum dots affect the current transport.

Keywords : hystereses , self-assembled quantum dots (SAQDs) , resonant tunneling

PACC : 6865 , 7340S , 7335C

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 69925410 , 19904015).