

## 研究快讯

# 含多层 InAs 量子点的双肖特基势垒 二极管输运特性研究 \*

李宏伟 王太宏

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2001 年 6 月 29 日收到 2001 年 8 月 4 日收到修改稿)

研究了含多层 InAs 量子点结构的双肖特基势垒的电流输运特性, 观察到了量子点的电子存储效应及其对电流的调制现象、电流多稳态现象和零点电压漂移现象。因为多量子点之间存在耦合作用, 造成器件中的很多亚稳态。通过器件的输运特性显示出比含单层量子点器件更复杂的结果。随着外加电压的变化, 器件经历很多弛豫过程。这些弛豫过程在电流-电压曲线中造成很多电流跳跃结构和各种噪声结构。

关键词: 多量子点, 迟滞现象, 单电子过程

PACC: 7360L, 7340S, 7335C

## 1 引 言

近年来人们对自组装量子点的研究不断深入, 但是大部分工作只是集中于量子点的生长<sup>[1,2]</sup>、结构<sup>[3,4]</sup>和光学性质<sup>[5]</sup>, 对通过自组装量子点的电学输运性质的研究还比较少<sup>[6]</sup>。我们曾经报道过通过含单层自组装 InAs 量子点的双肖特基势垒的输运特性<sup>[7]</sup>, 在我们的器件中观察到了电流迟滞回路现象, 这种迟滞回路是由于量子点的充放电状态对肖特基势垒的调制作用造成的。本文将报道含多层量子点结构的双肖特基势垒器件的电流输运特性, 因为在这种器件中多量子点层之间存在耦合相互作用, 可以预期它必定给出比含单层量子点的器件更复杂的结果。

我们制作了包含 7 层 InAs 量子点的金属-半导体-金属 (MSM) 二极管器件, 并在 77 K 下测试了器件的输运特性。我们在电流-电压 (I-V) 曲线中观察到三个显著的现象: 电流迟滞回路, 电流跳跃结构和零点电压漂移现象。与含单层量子点的器件比

较, 两种器件都存在由于电子存储效应引起的电流回路现象和量子点中电子放电引起的电流跳跃结构<sup>[7]</sup>。与含单层量子点器件不同的是我们还观察到了多稳态现象和零点电压漂移现象。另外, 这种多层量子点器件还表现出比单层量子点器件更大的噪声特性, 我们认为这些现象来源于多量子点层之间的耦合相互作用, 这种耦合造成电子随外加偏压在不同层的量子点之间重新分布, 导致很多亚稳态和弛豫过程。

## 2 器件制作

器件是用分子束外延 (MBE) 在 (100) 的半绝缘 GaAs 衬底上生长的。器件的结构如图 1 所示, 包括 1.0  $\mu\text{m}$  的 GaAs 缓冲层, 掺杂浓度为  $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的 330 nm Si-GaAs 层, 7 层 InAs 量子点以及 10 nm 的 GaAs 中间层, 最后一层 InAs 量子点的覆盖层为 4 nm GaAs。样品从 MBE 设备中取出后, 为尽量减小表面氧化, 样品取出后立即按标准器件工艺做成 MSM 结构, 电极使用的金属为 Au。电学测量在各

\* 国家自然科学基金(批准号 69925410 和 19904015)资助的课题。

金属电极之间进行。

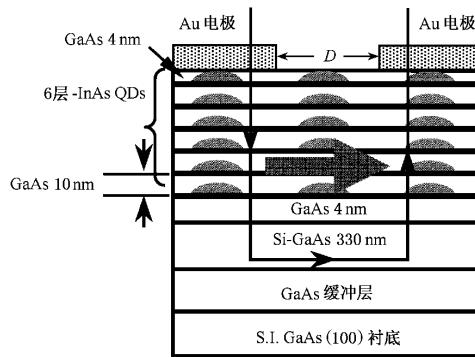


图 1 多层 InAs 量子点样品结构示意图

### 3 测试结果与讨论

在图 2 中, 我们给出了不同电压范围的 3 个典型电压范围的  $I-V$  曲线, 从上到下对应的电压范围分别为  $\pm 4.0$ ,  $\pm 5.0$  和  $\pm 6.0$  V。为了清楚起见, 3 个曲线由下至上依次平移了一个数量级, 图 2 中曲线附近的箭头标出了电压扫描方向, 中间那条曲线的扫描方向与底部曲线相同。从图 2 中我们可以看到 3 种典型的现象: 1) 3 条曲线中全有电流回路; 2) 3 条曲线中全有电流跳跃结构; 3) 底部的两条曲线中有电压漂移现象。下面我们将分别分析这 3 种现象。

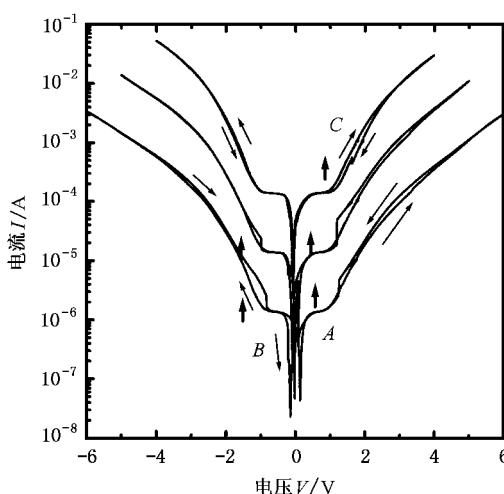


图 2 3 个不同的电压扫描范围的  $I-V$  曲线 由下向上依次有一个数量级的平移

我们首先分析电流回路现象。与我们以前报道的单层量子点器件类似, 多层量子点器件中普遍存在电流回路现象。然而, 在图 2 中我们注意到顶部曲线的迟滞回路方向与下面两条迟滞回路的方向不同。底部两条曲线的迟滞回路与我们在单层量子点器件中观察到的一样, 电压上升(从 0 V 向两端扫描)时的电流小, 电压下降(从两端向 0 V 扫描)时的电流大。但是图 2 中最上面的曲线给出的结果刚好相反, 即当扫描端点的电压小于  $\pm 4.0$  V 时, 器件在电压上升扫描时给出的电流值比在电压下降扫描时给出的电流值大。当图 2 中的 3 条曲线无平移的画在一起时, 我们可以看到, 电压上升扫描时的电流幅度几乎是相同的, 而电压下降扫描时的电流则根据扫描电压范围的不同而变化, 得到比电压上升扫描时大或小的值。当电压范围小于  $\pm 4.0$  V 时, 电压下降扫描时得到的电流幅度比电压上升扫描时小。这种现象在所有多量子点器件中都得到证实, 它与多量子点的耦合导致的充放电效应有关。我们曾经解释了单量子点的电流回路现象<sup>[7]</sup>, 与之类似, 图 2 底部两条曲线的电流回路是由于肖特基势垒耗尽区中的量子点的充放电引起的, 当肖特基势垒为正向时其中的量子点被充电, 然后当此势垒处于反向偏压下时, 充电量子点阻塞反向电流从而得到小的电流曲线。最终当反偏肖特基势垒中的电场强度大得足以将电子拉出量子点时, 量子点放电, 通过肖特基势垒的电流增大, 这对应电压下降扫描时的结果。

但是在多层量子点器件中, 因为多量子点之间的相互耦合, 在肖特基势垒的内建电场和外加电场的作用下, 电子易于由靠近界面的量子点转移到内层量子点, 从而削弱了量子点充放电效应对电流的调制作用。因为电流回路是由于量子点不同的充放电状态对肖特基势垒的调制造成的, 不同的回路方向反映了不同的充放电过程和状态。从我们的结果可看出, 只有当电压扫描范围大于  $\pm 4.0$  V 时由外加偏压控制的量子点充放电过程导致的调制效应才能在电流输运中起作用。当电压扫描范围小于  $\pm 4.0$  V 时电流迟滞回路与之相反, 表明此时在输运过程中对量子点充放电过程起作用的还有其他机理, 这一点我们将在后面讨论。

下面我们分析曲线中的电流跳跃结构。图 2 中的  $I-V$  曲线都具有电流跳跃结构, 并且只是出现在电压下降的扫描过程中。当扫描范围大于  $\pm 4.0$  V,

即迟滞回路正常时，在电压下降扫描的过程中所有曲线在相同的电压范围内出现由上向下的电流跳跃，如图 2 中竖直箭头标出的 A 和 B 点，它们对应的电压范围分别为 1.15—1.25 和 -0.8—-1.0 V。在我们这种多层量子点结构的器件中，所有的测试曲线都给出具有电流跳跃结构的结果，且电流跳跃发生的电压范围较小。表明图 2 中底部两条曲线中的高电流对应的状态在低偏压范围是亚稳态，随着电压的扫描到一定程度后会弛豫到稳定态。不同的电流跳跃结构在含单层量子点的器件中也被观察到，它的出现与量子点的充放电过程有关。在电压扫描端点处，靠近肖特基接触的大多数量子点在电场作用下放电，但是因为多层结构中有些量子点离肖特基势垒较远，反向偏压不足以使它们放电。在测试过程中，随着反向偏压的降低，电子需要在多量子点之间重新分布以保持多层量子点结构处于稳定状态，这种重新分布导致靠近肖特基势垒的量子点充电。这种多量子点的充电效应导致 I-V 曲线中的电流跳跃。

图 2 中顶部曲线在电压下降扫描的过程中出现向上的电流跳跃结构，如箭头 C 所标出的。在图 3 及其插图中，我们给出了器件从 1.5 到 3.0 V 之间连续两次扫描时的 I-V 特性，图 3 是部分放大图，图 3 中插图是对数坐标下的整体图。可以看出多次扫描时的结果具有很好的重复性。其特点是在电压下降的过程中出现电流跳跃，最明显的结构出现在 1.85 V 左右，然后紧随其后的是几次小的电流跳跃和噪声结构。这种逐渐变化的电流跳跃和噪声结构在含单层量子点的器件中没有被观察到，我们认为这是由于多量子点向稳定态弛豫的结果，它的根源在于多量子点之间具有库仑阻塞效应，当一个量子点串俘获更多电子或它们的电子重新分布时，由于库仑相互作用会影响到量子点附近的区域甚至其他量子点，使量子点的充电状态和通过器件的电流发生变化，出现跳跃结构。因为所有电压上升的扫描过程给出了相同的电流幅度，而电压下降扫描给出了或大或小的幅度，因此可以相信从 0 V 到电压端点的电压上升扫描过程对应的是器件的最稳定状态。随着电压的升高，多量子点层充入更多电子以及量子点的放电过程都使器件进入亚稳状态，这些状态在一定条件下会弛豫回到稳定态，这种弛豫过程对应于正常或相反的迟滞回路中向上或向下的跳跃结构。

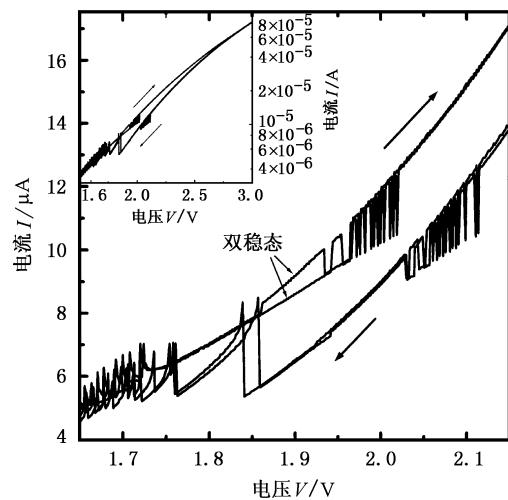


图 3 器件在 1.5 和 3.0 V 之间连续两次电压扫描给出的 I-V 曲线的部分放大图 插图为对数坐标下的整体图

在图 3 中，1.75 V 以下的噪声结构出现在所有的曲线中。在电压下降扫描的过程中，噪声在电流跳跃后出现，可以将它看作是许多小的电流跳跃的混合。同样的结构也出现在电压上升扫描的过程中，在这些噪声结构出现以后，两次扫描中都出现了双稳现象（如图 3 中所标示）。这表明所谓的稳定状态并不是绝对的稳定而是包括了许多小的随机的充电和放电过程。当电压处于 1.9 到 2.1 V 之间时，所有的曲线中出现了额外的噪声结构，这种结构在所有扫描中都存在，包括图 2 中的 3 条曲线，它们出现在电流幅度相同的位置，与扫描方向以及扫描电压范围无关。这种噪声的结构与随机电报码信号非常相似<sup>[8,9]</sup>，可能与量子点阵列中单电子的俘获和发射过程有关。在多量子点阵列生长时，量子点之间的 GaAs 间隔层也是在生长量子点的温度下生长的，它们有可能包含一些深能级缺陷，但是这些缺陷的能级与量子电能级相比通常较低<sup>[10]</sup>，在 77 K 下的测试中很难被激活，因此在我们的测试中通过这种能级的效应基本上可以忽略。我们观察到的这种噪声结构可能与量子点层之间的应变耦合效应和量子电界面的缺陷有关。

下面我们分析零点电压漂移，在图 2 中底部的两条曲线在两个电压扫描方向上扫描时都不能通过原点而是有一定的漂移。这种电压漂移意味着在电压达到原点之前电流已变为零，然后反向增加。两个扫描方向的电压漂移量都随着扫描范围的增大而增大，并且随着温度的上升而减小。我们在 4 个不同的温度下测试了不同电压扫描范围的 I-V 曲线，

统计了电压漂移量随扫描电压范围的变化,结果示于图4。在77 K下,当电压扫描范围小于 $\pm 4.0$  V时,电压漂移量很小,而当扫描范围大于 $\pm 5.0$  V时漂移量随扫描范围的增加迅速增大,这是由于多量子点阵列具有明显的电容效应,使得量子点在充电后逐渐放电。当扫描范围较大时会有更多的InAs量子点被充电,然后在小电压时自发放电从而导致了较大的电压漂移。在77 K下当电压扫描范围较小时,电流回路是反向形成的而且电压漂移很小,这是因为在7层量子点阵列结构中,量子点间的耦合效应导致电子随外加电压的变化在不同的量子点之间重新分布,这将会对其传输特性起重要作用<sup>[11,12]</sup>。多层量子点间的耦合效应使量子点的电子波函数相互重叠并在多层之间扩展<sup>[13]</sup>,削弱了对电子的限制作用。因此电子能够在多量子点间重新分配而且可以很容易地逃离量子点。因此与含单层InAs量子点的样品相比,我们观察到较小的电流回路。

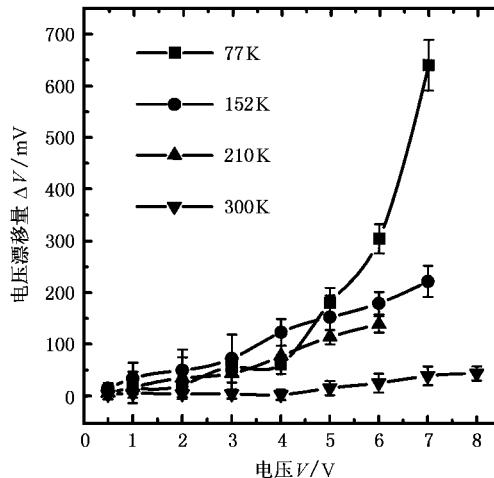


图4 不同温度下电压漂移量随扫描范围的变化

在图4中,电压漂移随着温度的升高而减小,在300 K时即使扫描范围很大也几乎观察不到。同时我们还可以看到电流迟滞回路随着温度上升而减小,这与我们在含单层量子点器件中观察到的现象相同,这表明热激活效应在器件的输运过程中起着

越来越重要的作用。另外,我们还观察到的一个现象是电流迟滞回路的翻转随着温度的升高变得越来越占优势,在152 K时即使偏压较大仍形成相反的回路。这种翻转是由于多层量子点的充电效应引起的,对于那些远离金属半导体界面的量子点,有两种机理影响它们的充放电状态:反向电压的电场和流过量子点电流。当反向偏电压较大时,电场有使量子点放电的趋势但同时电流还有对量子点充电的效应。当量子点层距离金属半导体界面较近,电场的放电作用占支配地位。但有些量子点距离金属半导体界面较远,电场很弱,因此两种效应相互竞争,充放电过程由两者中较强的元素决定。当扫描电压范围大于 $\pm 4.0$  V时,强电场作用下的放电效应是主要的,形成正常的迟滞回路。随着扫描范围的缩小,电场不足以引起明显的放电,此时电流的充电效应变得越来越明显,逐渐在I-V特性中占据支配地位,造成电流迟滞回路发生翻转。随着温度的升高,反偏肖特基势垒的电流近似指数增长,所以电流的充电效应在高温下起主导作用,直到被俘获的电子热激发逃出量子点。

## 4 结语

我们研究了含多层InAs量子点的双肖特基势垒的电流输运性质,观察到了由于量子点的充放电效应和多量子点间的相互作用导致的电流回路和多稳态现象。当测试电压范围较小时,系统处于稳定状态的概率较大,而较大测试偏压范围增大导致量子点处于亚稳态,在小偏压时这些亚稳态会弛豫到稳定状态。这种弛豫与量子点中的单电子充放电过程有关,并在I-V曲线中造成电流跳跃和噪声结构。另外,对于两个不同的电压扫描方向我们还观察到了电压漂移现象,电压漂移量随扫描电压范围的增大而增加,并随温度的升高而减小,这一现象是由InAs量子点阵列中的电子在弛豫过程中,不仅在多量子点之间重新分布,有一些可以逃离量子点,造成量子点放电。

[1] J. M. Moison, F. Houzay, F. Barthe, L. Leprince, E. André, O. Vatel, *Appl. Phys. Lett.*, **64**(1994), 196.

[2] G. MedeirosRibeiro, K. Schmidt, T. Ngo, J. L. Feng, A. Lorke,

J. Koithaus, P. M. Petroff, *Appl. Phys. Lett.*, **71**(1997), 2014.

[3] Z. M. Wang *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **47**(1998), 89 (in Chinese)

- [ 王志明等 , 物理学报 , 47(1998) , 89 ].
- [ 4 ] P. Ballet , J. B. Smathers , G. J. Salamo , *Appl. Phys. Lett.* , **75** (1999) , 337.
- [ 5 ] Z. D. Lü *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **48**(1999) , 744 (in Chinese) [ 吕振东等 , 物理学报 , 48(1999) , 744 ].
- [ 6 ] G. Yusa , H. Sakaki , *Appl. Phys. Lett.* , **70**(1997) , 345.
- [ 7 ] H. W. Li *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **50**(2001) , 74 (in Chinese) [ 李宏伟等 , 物理学报 , 50(2001) , 74 ].
- [ 8 ] T. Sakamoto , Y. Nakamura , K. Nakamura , *Appl. Phys. Lett.* , **67**(1995) , 2220.
- [ 9 ] Aigouy , T. Holden , F. H. Pollak , N. N. Ledenstov , W. M. Ustinov , P. S. Kop 'ev , D. Bimberg , *Appl. Phys. Lett.* , **70** (1997) , 3329.
- [ 10 ] J. C. Bourgoin , T. Neffati , *Solid State Electron.* , **43**(1999) , 153.
- [ 11 ] T. Nakano , T. Nakagawa , K. Yoh , *Jpn. J. Appl. Phys.* , **36** (1997) , 4283.
- [ 12 ] S. Sanguinetti , M. Padovani , M. Gurioli , E. Grilli , M. Guzzi , A. Vinattieri , M. Colocci , P. Frigeri , S. Franchi , *Appl. Phys. Lett.* , **77**(2000) , 1307.
- [ 13 ] M. Sugawara , Y. Nakata , K. Mukai , H. Shoji , *Phys. Rev.* , **B55**(1997) , 13155.

## CURRENT TRANSPORT THROUGH STACKED InAs QUANTUM DOTS EMBEDDED IN A SCHOTTKY BARRIER<sup>\*</sup>

LI HONG-WEI WANG TAI-HONG

( Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

( Received 26 June 2001 ; revised manuscript received 4 August 2001 )

### ABSTRACT

We have investigated the transport properties of a metal-semiconductor-metal structure containing multi-layers of InAs quantum dots from 77 K to room temperature. Three distinct phenomena are observed in the current-voltage( *I-V* ) curves : the hysteresis loops , current jumps and voltage offsets. Because of the coupling between the multi-layered quantum dots , the devices made of these quantum dots exhibit much more complicated phenomenon than the devices containing single-layer quantum dots. The devices may undergo many metastable states and relaxation processes. These processes would induce current jump structures and noise in the *I-V* curve.

**Keywords** : multi-layered quantum dots , hysteresis loop , single-electron process

**PACC** : 7360L , 7340S , 7335C

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 69925410 and 19904015 ).