

# 量子点器件的三端电测量研究\*

竺 云 王太宏

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

(2002 年 6 月 5 日收到,2002 年 7 月 29 日收到修改稿)

利用三端电测量方法,研究了调制掺杂二维电子气结构的量子点器件输运特性.报道了可分别测量二维电子气电阻和量子点隧穿电阻的实验方法.实验结果表明:量子点的横向耦合控制了量子点器件在小偏压下的电输运特性.

关键词:自组装量子点,二维电子气,量子隧穿,肖特基接触

PACC: 6865, 7320D, 7335C, 7360L

## 1. 引 言

纳米研究越来越热,也越来越深入.纳米研究主要包括纳米材料、纳米加工和纳米器件.目前纳米材料的研究已经非常广泛和深入,纳米加工技术的研究也已达到很高水平,其加工精度已达到原子尺度.但是对纳米器件的研究却不很深入.目前大家公认的纳米器件有(1)量子点器件<sup>[1-10]</sup>、(2)单电子器件<sup>[11-15]</sup>和(3)共振隧穿器件<sup>[16-18]</sup>.量子点器件在光、电领域都有广泛的应用,如量子点激光器、理想单光子源和量子点存储器等,而且量子点器件可进一步发展为单电子器件.所以量子点器件是纳米器件中最典型的,最具有潜在应用前景的器件.

文献[1]设计了类欧姆接触的肖特基接触的量子点器件,研究了量子点的充放电对肖特基二极管电特性的影响,并观察到量子点的存储效应与共振隧穿共存现象.本文采用三端电测量方法,对量子点和二维电子气的输运特性进行了进一步研究,发现三端电测量方法可分别测量二维电子气电阻和量子点隧穿电阻.实验结果表明:量子点的横向耦合控制了样品的电输运特性.

## 2. 样品生长与器件制备

实验所用材料结构由分子束外延(MBE)方法生

长,如图1所示,使用了掺Si的 $n^+$ 衬底,器件结构由下至上包括:1.0 $\mu\text{m}$   $n^+$ -GaAs 缓冲层,掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ;70nm  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  超晶格势垒,其中 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 厚度为5nm,GaAs为2nm,共10层; $\delta$ -Si 掺杂层,掺杂后的载流子面密度为 $5.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ;4nm GaAs 层;InAs 量子点层,4nm GaAs 盖帽层.量子点是在衬底旋转的条件下生长的,InAs 淀积量为1.8ML.器件生长完成从MBE设备中取出后,在衬底表面光刻蒸发Au电极,形成肖特基接触. $I$ - $V$ 曲线测试在三个表面的金属电极之间进行,测量温度为室温.

本实验测量的器件电极分布如图2所示.大电极4的尺寸为 $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ ,小电极1和3的尺寸为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ ,测量电极间的间隔为 $50\mu\text{m}$ .为避免欧姆接触制备过程中沉积金属向量子点的渗透而引起量子点质量的退变,在这里采用薄的肖特基接触代替常规的欧姆接触作为器件的电极.如图1所示,在InAs量子点层上仅生长了4nm厚的GaAs盖帽层,使电子很容易隧穿通过肖特基势垒进入量子点.小偏压下的 $I$ - $V$ 测量结果表明:这种薄层的肖特基接触的确用来取代常规的欧姆接触而作为器件的引线.

\* 国家重点基础研究专项基金(批准号:G2001CB3095)和国家自然科学基金(批准号:69925410和60236010)资助的课题.

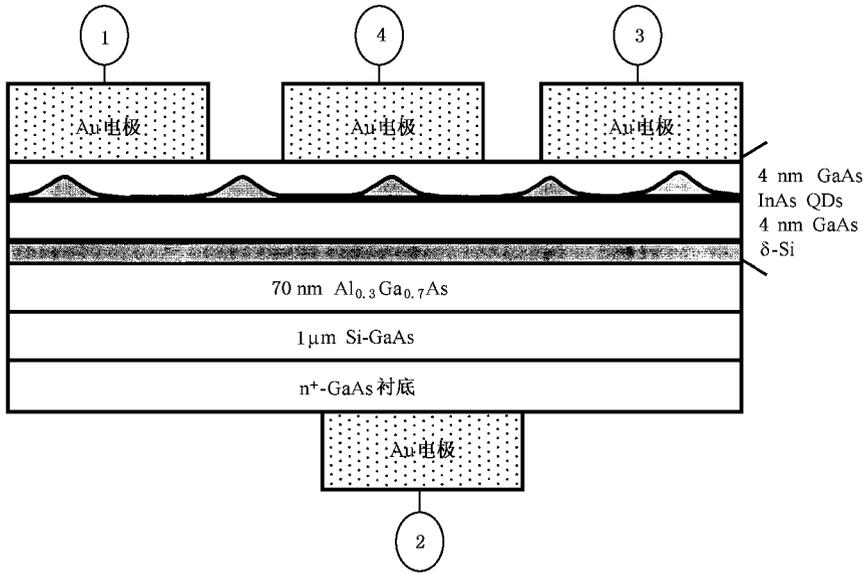


图 1 MBE 生长的 InAs 量子点器件结构示意图

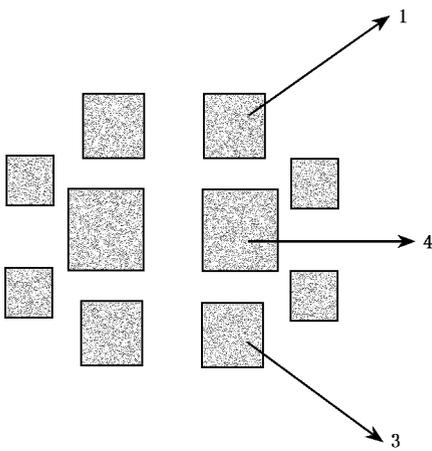
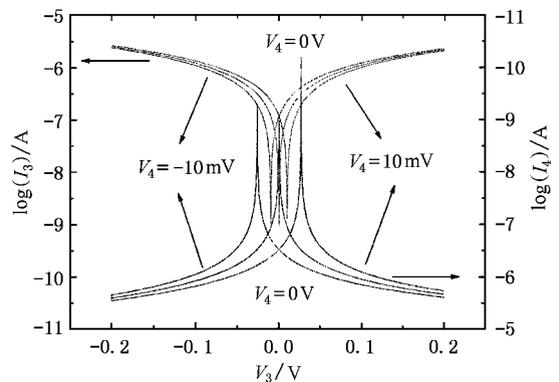


图 2 器件的表面结构示意图

0.4mV 的步进从  $-200\text{mV}$  扫描到  $+200\text{mV}$ ,  $V_4$  从左到右依次取  $-10\text{mV}$ ,  $0\text{V}$ ,  $+10\text{mV}$ . 图 3 中当  $V_4$  加不同偏压时  $\log(I_3)$  和  $\log(I_4)$  的峰出现的位置相对横坐标原点有不同的移动量, 而且  $\log(I_4)$  的移动大于  $\log(I_3)$  的移动.

图 3  $V_3$  以 0.4mV 的步进从  $-200\text{mV}$  扫描到  $+200\text{mV}$ ,  $V_4$  从左到右依次取  $-10\text{mV}$ ,  $0\text{V}$ ,  $+10\text{mV}$  时的  $\log(I)-V$  曲线图

### 3. 测量结果与讨论

图 1 中电极 2 为器件的背电极, 表面电极 3, 4, 1 用作三端测量. 图 2 为器件的表面结构示意图.

首先在无光情况下测量. 因为测量精度的要求较高, 为避免表面电流造成的误差, 样品室处于真空状态, 压强为  $5.5 \times 10^{-4} \pm 0.5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ . 测量位置如图 2 所示, 即测量点在一个器件上, 1 端设为接地, 3, 4 端分别加偏压  $V_3$ ,  $V_4$ , 扫描 3 端. 图 3 为  $V_4$  取不同偏压时, 对  $V_3$  扫描得出的  $\log(I)-V$  曲线图.  $V_3$  以

实验数据的对比列于表 1. 可以看到, 对于电流  $I_3$  列: 当  $V_3$ ,  $V_4$  同时加正偏压或同时加负偏压时,  $I_3$  值较小; 当  $V_3$ ,  $V_4$  加正负相反的偏压时,  $I_3$  值较大; 当  $V_3$  的偏压为  $0\text{V}$ ,  $V_4$  取大小相等、正负相反的偏压时,  $I_3$  值大小相近. 电流  $I_4$  也有与  $I_3$  相同的变化规律, 但  $I_4$  列的规律正好相反. 当  $V_3$ ,  $V_4$  同时加正偏压或同时加负偏压时,  $I_4$  值较大; 当  $V_3$ ,  $V_4$  加

正负相反的偏压时,  $I_1$  值较小; 当  $V_3$  的偏压为 0V,  $V_4$  取大小相等、正负相反的偏压时,  $I_1$  值大小相近. 由以上数据的对比, 可以将器件等效为图 4 所示电路模型.

表 1 三端电测量实验数据表

| $V_3/V$ | $V_4/mV$ | $I_3/10^{-7} A$ | $I_1/10^{-7} A$ | $I_4/10^{-7} A$ |
|---------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| -0.1    | -10      | -10.971         | 1.94518         | 9.01655         |
| -0.1    | +10      | -13.3673        | 1.74447         | 15.1177         |
| +0.1    | -10      | 12.3365         | 1.84597         | -14.1788        |
| +0.1    | +10      | 10.1666         | -2.03583        | -8.13347        |
| 0       | -10      | 1.16344         | 1.89272         | -3.05556        |
| 0       | +10      | -1.14553        | -1.88709        | 3.03332         |

器件的透射电子显微镜(TEM)图显示了电极下的量子点是均匀的<sup>[19]</sup>, 量子点的等效电阻为  $R_Q$ . 金电极与半导体的接触电阻为  $R_M$ , 1 和 4 之间、4 和 3 之间的二维电子气等效电阻分别为  $R_{14}$ ,  $R_{43}$ . 定义  $R_3 = R_M + R_Q + R_{43}$ ,  $R_4 = R_M + R_Q$ ,  $R_1 = R_M + R_Q + R_{14}$ . 根据图 4 的等效电路可以很清楚地解释电流的大小与电压的关系以及  $\log(I_3)$ ,  $\log(I_4)$  的峰值移动现象.

当  $V_3, V_4$  同为正偏压或同为负偏压时, 3 和 4

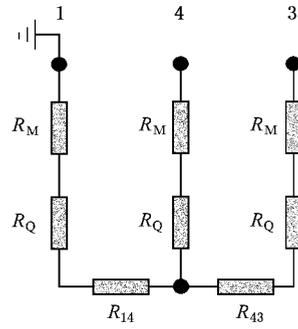


图 4 器件运输过程的等效电路图

之间的作用等效于图 5(a),  $V_3, V_4$  相当于两个背靠背或面朝面的电源, 总电源等于两电源的差, 所以 3 和 4 之间电流值较小; 当  $V_3, V_4$  加的偏压的正负性不同时, 3 和 4 之间的作用等效于图 5(b),  $V_3, V_4$  相当于两个串联的电源, 所以 3 和 4 之间电流值较大. 再来讨论  $I_1$  值的变化, 由于 1 端接地,  $I_1$  值粗略近似为 3、4 电位之和与电阻的比值, 即  $I_1 = \frac{V_3 + V_4}{R}$ ,  $|V_3 + V_4|_{V_3, V_4 \text{同号}} > |V_3 + V_4|_{V_3, V_4 \text{异号}}$ , 所以  $I_1$  值在  $V_3, V_4$  同为正偏压或同为负偏压时较大. 最后, 当  $V_3$  的偏压为 0V 时, 三极间的关系相当于图 5(c), 这时  $I_1, I_3, I_4$  值由  $V_4$  决定, 所以  $V_4 = \pm 10\text{mV}$  只改变电流方向而大小基本不变.

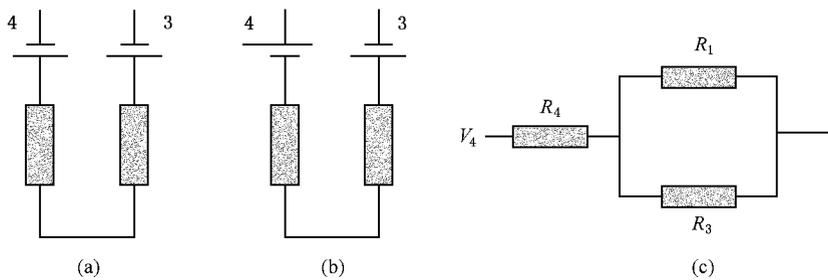


图 5 加偏压后, 电极间的等效图

以下定量计算移动的大小与  $V_3, V_4$  的偏压以及电阻间的关系. 在  $\log(I)-V$  曲线中, 横轴是扫描电压  $V_3$ , 纵轴是对  $I_3$  或  $I_4$  取绝对值, 再取对数得到的, 所以曲线中峰出现的位置也就是  $I_3, I_4 = 0$  的位置. 那么为什么这时的峰值不在  $V_3 = 0\text{V}$  时产生, 而是有一定的移动呢? 这是因为当  $V_4$  取不同的偏压时,  $V_3$  对应也要取不同的偏压才能使  $I_3$  或  $I_4 = 0$ ,  $I_3, I_4 = 0$  对应的  $V_3$  处才出现  $\log(I)$  的峰值. 具体分

析如图 5(c) 所示, 当  $V_3 = 0\text{V}$  时,

$$\begin{aligned}
 I_3 &= I_4 \frac{R_1}{R_1 + R_3} \\
 &= \frac{V_4}{R_4 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} \frac{R_1}{R_1 + R_3} \\
 &= \frac{V_4 R_1}{R_4(R_1 + R_3) + R_1 R_3} \neq 0,
 \end{aligned}$$

所以峰值不出现. 设  $V_3 = V'_3$  时,  $I_3 = 0$ , 如图 5(a).

$$\left. \begin{aligned} I_4 &= \frac{V_4 - V'_3}{R_4} \\ I_1 &= \frac{V'_3}{R_1} \\ I_4 &= I_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V'_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_4} V_4 = \frac{1}{1 + \frac{R_4}{R_1}} V_4. \quad (1)$$

在  $V'_3$  处  $\log(I_3)$  曲线出现峰值, 峰值的移动量等于  $V'_3$ , 很明显,  $V'_3 < V_4$ , 即移动量小于  $V_4$  的取值.

由 (1) 式可以推出:

- 1) 当  $R_1 \gg R_4$  时,  $V'_3 \approx V_4$ ;
- 2) 当  $R_1 \ll R_4$  时,  $V'_3 \rightarrow 0$ ;
- 3) 当  $R_1$  与  $R_4$  可比时,  $V'_3$  与  $V_4$  呈一定的比例关系. 同样地, 当  $V_3 = 0V$  时,  $I_4 \neq 0$ ,  $\log(I_4)$  也不产生峰值. 设  $V_3 = V'_3$  时,  $I_4 = 0$ , 如图 6(b).

$$\left. \begin{aligned} I_3 &= \frac{V''_3 - V_4}{R_3} \\ I_1 &= \frac{V_4}{R_1} \\ I_3 &= I_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V''_3 = \frac{R_1 + R_3}{R_1} V_4 = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) V_4. \quad (2)$$

在  $V''_3$  处  $\log(I_4)$  曲线出现峰值, 峰值的移动量等于  $V''_3$ , 很明显,  $V''_3 > V_4$ , 即移动量大于  $V_4$  的取值.

由 (2) 式, 可以推出:

- 1) 当  $R_1 \gg R_3$  时,  $V''_3 \approx V_4$ ;
- 2) 当  $R_1 \ll R_3$  时,  $V''_3 \rightarrow \infty$ ;
- 3) 当  $R_1$  与  $R_3$  可比时,  $V''_3$  与  $V_4$  呈一定的比例关系.

对比 (1) 与 (2) 式, 可得出  $V'_3 < V_4 < V''_3$ , 所以在  $\log(I)-V$  曲线中, 可以明显观察到  $\log(I_4)$  的移动大于  $\log(I_3)$  的移动.

我们在一个器件上改变测量点进行了多次测量分析, 这样就可以粗略计算出  $R_1, R_3$  和  $R_4$  的大小. 首先, 抬起 3 端, 测量 1 和 4 端的电压  $V_A$  与电流  $I_A$ , 就可以得出 1 和 4 端的电阻, 即

$$R_1 + R_4 = V_A / I_A. \quad (3)$$

放下 3 端, 抬起 4 端, 测量 1 和 3 端的电压  $V_B$  与电流  $I_B$ , 就可以得出 1 和 3 端的电阻, 即

$$R_1 + R_3 = V_B / I_B. \quad (4)$$

然后, 联立 (1) 和 (2) 式, 在数据表中查到  $V'_3, V''_3, V_4$ , 就可以解出  $R_1, R_3$  和  $R_4$ . 表 2 给出一组计算值.

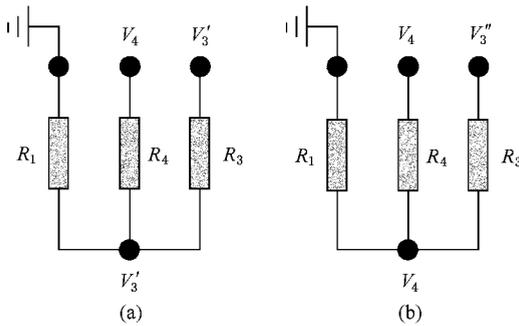


图 6  $I_3 = 0$  的等效电路图 (a) 和  $I_4 = 0$  的等效电路图 (b)

表 2 三端电测量计算值

| $V_4/V$ | $V'_3/V$ | $V''_3/V$ | $(V_A/I_A)/\Omega$ | $(V_B/I_B)/\Omega$ | $R_1/\Omega$ | $R_3/\Omega$ | $R_4/\Omega$ |
|---------|----------|-----------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| -0.01   | -0.0092  | -0.026    | 51481.642          | 135594.635         | 49757.446    | 85837.189    | 1724.196     |
| +0.01   | +0.0092  | +0.0264   | 51772.429          | 136691.951         | 49703.944    | 86988.007    | 2068.485     |

比较  $R_1, R_3$  与  $R_4$ , 发现  $R_1, R_3$  比  $R_4$  大一个数量级,  $R_1$  和  $R_3$  数量级相同. 这可能是由两种机理导致 (1) 量子点的充放电效应 (2) 量子点的横向强耦合作用. 一旦量子点俘获电子即充电后, 量子点的静电势能将会被抬高. 这样, 每个充电的量子点都相当于一个独立的库仑岛, 对流过的电流有阻碍作用. 当  $V_3, V_4$  取大小相同、正负相反的偏压时,  $R_1, R_3$  与  $R_4$  的值应该有量级的差别, 而表 2 中  $R_1$  变化不超过 0.1%,  $R_3$  变化不超过 1.34%,  $R_4$  变化不超过 19.97%, 所以量子点的充放电效应在这里不起主要

作用. 由于量子点的横向强耦合作用, 这里计算出的  $R_1$  和  $R_3$  中的  $R_{14}$  和  $R_{43}$  实际是二维电子气和横向量子点并联的电阻值. 因为  $R_1, R_3$  不仅包含量子点的电阻  $R_Q$ 、金电极与半导体的接触电阻  $R_M$ , 还包含了  $R_{14}$  和  $R_{43}$ , 所以  $R_1, R_3$  比  $R_4$  大. 由此可以知道二维电子气的电阻值很大, 而且可以解释一般情况下的测量曲线中,  $\log(I_3)$  的峰值移动量趋近于  $V_4$ , 而  $\log(I_4)$  的峰值移动量与  $V_4$  呈一定比例关系.

我们还进行了光照情况下的测量, 测量点同前, 仍旧是在一个器件上, 如图 2 所示. 图 7 是器件在无

光和光逐渐增强时的  $\log(I_3)-V$  曲线对比图. 随光照强度的增加,  $\log(I_3)$  曲线逐渐上移, 最小值对应的  $V_3$  有微小移动. 在无光照下,  $V_4 = 0V$  时,  $\log(I_3)$  的最小值正好在  $0V$ . 我们定义  $V_4 \neq 0$  时或光照下  $\log(I_3)$  的最小值的位置相对  $0V$  的移动量为  $A$ . 由图

二维电子气的电阻可能减小. 所生长的含量子点的二维电子气的迁移率一般都很小, 本实验样品的迁移率小于  $10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , 且二维电子气的浓度小于  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . 因为二维电子气的浓度很稀薄, 沟道中的电子数很少, 电子一般只在基态能级上分布, 这时的载流子迁移率主要受量子点的散射影响. 光照后, 二维电子气的浓度增加, 增强了电子对量子点散射的屏蔽作用, 所以光照可提升迁移率. 这相当于减小了二维电子气的电阻值. 由于  $R_1$  包含二维电子气的电阻, 所以  $\frac{R_4}{R_1}$  的比值增大. 由(1)式可知, 当  $\frac{R_4}{R_1}$  增加时,  $V_3'$  减小, 即峰值的移动减小.

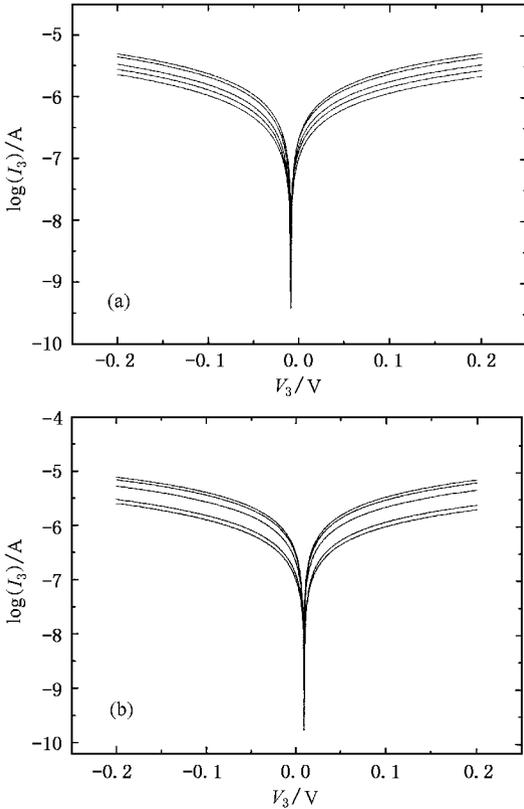


图 7  $V_3$  的扫描范围为  $-200\text{mV}$  到  $200\text{mV}$ ,  $V_4$  取  $-10\text{mV}$  时的  $\log(I_3)-V_3$  随光强变化的曲线(a)和  $V_4$  取  $+10\text{mV}$  时的  $\log(I_3)-V_3$  随光强变化的曲线(b)

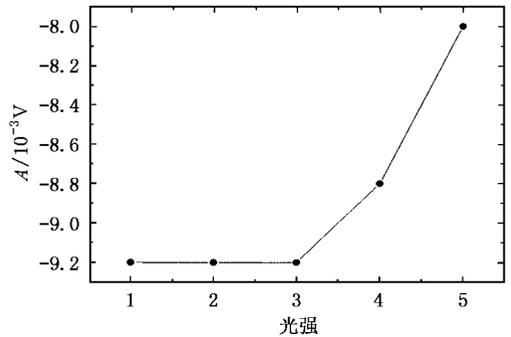


图 8  $\log(I_3)$  的最小值的位置相对  $0V$  的移动量  $A$  与光强的关系曲线

8 可知, 当光强小于 3 时,  $A$  随光强的增加几乎无变化; 当光强增加到 3 后,  $A$  随光强的增加而明显减小. 当有光照射半导体器件时, 会产生光生载流子, 增大了二维电子气的载流子浓度, 从而使所对应的

### 4. 结 论

本文利用薄的肖特基接触作为量子点纳米器件的欧姆接触引线, 并采用三端电测量方法研究了量子点器件的电特性. 通过对建立电路模型的分析, 发现利用三端电测量方法可对量子点和二维电子气的输运特性分别进行研究. 测量结果表明: 小偏压下量子点的横向耦合控制了样品的电输运特性; 光照会减小二维电子气的电阻值.

[ 1 ] Wang T H, Li H W and Zhou J M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2160  
 [ 2 ] Li H W and Wang T H 2000 *Phys. Low-Dim. Struct.* **9/10** 119  
 [ 3 ] Li H W and Wang T H 2001 *Appl. Phys.* **A 73** 615  
 [ 4 ] Li H W and Wang T H 2001 *Physica B* **301/3-4** 174  
 [ 5 ] Li H W and Wang T H 2001 *Physica B* **304/1-4** 107

[ 6 ] Li H W and Wang T H 2001 *Phys. Low-Dim. Struct.* **5/6** 129  
 [ 7 ] Li H W and Wang T H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 262 (in Chinese)  
 [ 李宏伟、王太宏 2001 物理学报 **50** 262 ]  
 [ 8 ] Li H W and Wang T H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2038 (in Chinese)  
 [ 李宏伟、王太宏 2001 物理学报 **50** 2038 ]

- [ 9 ] Li H W and Wang T H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2501( in Chinese )  
[ 李宏伟、王太宏 2001 物理学报 **50** 2501 ]
- [ 10 ] Li H W and Wang T H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2506( in Chinese )  
[ 李宏伟、王太宏 2001 物理学报 **50** 2506 ]
- [ 11 ] Wang T H ,Li H W and Zhou J M 2002 *Nanotechnology* **13** 221
- [ 12 ] Wang T H ,Li H W and Zhou J M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1537
- [ 13 ] Wang T H ,Li H W and Zhou J M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2160
- [ 14 ] Wang T H and Aoyagi Y 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 634
- [ 15 ] Fu Y ,Willander M and Wang T H 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3705
- [ 16 ] Fu Y ,Wang T H and Willander M 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1758
- [ 17 ] Wang T H ,Mei X B ,Jiang C ,Huang Y ,Zhou J M and Yang G Z 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1149
- [ 18 ] Wang T H ,Mei X B ,Jiang C ,Huang Y ,Zhou J M ,Huang X G ,Cai C C ,Yu Z X ,Luo C P ,Xu J Y and Xu Z Y 1992 *Phys. Rev. B* **46** 16160
- [ 19 ] Zhang Q ,Zhu J ,Ren X W ,Li H W and Wang T H 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3830

## Investigations of three-terminal electronic measurement on quantum dot devices \*

Zhu Yun Wang Tai-Hong

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

( Received 5 June 2002 ; revised manuscript received 29 July 2002 )

### Abstract

Three-terminal electronic measurements have been performed on quantum devices with a modulation-doped two-dimensional (2D) electron gas structure. The resistance with the 2D electron gas and that with the tunnel resistance through the dots can be obtained by analyzing the experimental data. Our results show that the lateral coupling between the quantum dots mainly determine the transport properties of the quantum dot devices under small biases.

**Keywords** : self-assembled quantum dot , two dimensional electron gas , quantum tunneling , Schottky contacts

**PACC** : 6865 , 7320D , 7335C , 7360L

\* Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China( Grant No. G2001 CB3095 ) and the National Natural Science Foundation of China( Grant Nos. 69925410 and 60236010 ).