

双栅调控的硅量子线中的库仑振荡效应*

张贤高¹⁾ 方忠慧¹⁾ 陈坤基^{1)†} 钱昕晔¹⁾ 刘广元¹⁾ 徐骏¹⁾ 黄信凡¹⁾ 何飞²⁾

1) (南京大学物理系, 固体微结构国家实验室, 南京 210093)

2) (无锡华润华晶微电子有限公司, 无锡 214061)

(2010年4月28日收到; 2010年5月29日收到修改稿)

基于单电子隧穿和库仑阻塞效应, 研究了硅量子线中的单电子输运特性. 利用绝缘体上硅薄膜材料作为衬底构建侧栅结构的硅量子线单电子晶体管, 通过背栅和侧栅对量子线的电子输运特性进行调制. 实验发现, 在硅量子线中分别观察到背栅和侧栅调制的单电子效应和库仑振荡现象. 从微分电导的二维灰度轮廓图, 清楚地观察到了库仑阻塞区, 说明由于栅压导致在硅量子线中形成了库仑岛.

关键词: 库仑振荡, 单电子效应, 硅量子线

PACS: 73.23.Hk, 73.63.-b

1. 引言

随着器件尺寸不断缩小, 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 大规模集成电路将面临诸多技术问题, 如短沟道效应、寄生电阻和电容、功耗和散热等问题. 在纳米科学和纳米电子学飞速发展的今天, 基于单电子隧穿效应和库仑阻塞效应的单电子晶体管得到广泛的研究^[1-3]. 单电子晶体管可以实现对单个电子的精确控制, 在操作方面只有几个甚至单个电子参与, 因此它具有极低的功耗和超快的开关速度, 可以广泛应用于超高速、低功耗逻辑功能集成器件、微弱电流测量仪、高灵敏静电计、量子信息存储等领域^[4-6], 是下一代低功耗、高密度集成电路的最基本元件^[7,8].

经典的单电子晶体管由一个库仑岛和两个隧穿结组成, 电子通过隧穿实现从一个电极经过库仑岛再到另一个电极的输运过程. 当有一个电子发生隧穿行为时, 就会有一个电流峰. 随着外加栅压的变化, 源漏电流会呈现周期性的振荡, 这就是经典的库仑阻塞和库仑振荡. 为了在室温下看到库仑阻塞效应, 库仑岛的尺寸必须在纳米量级. 当前, 已经报道的硅基单电子晶体中库仑岛可以用自组织的生长方式, 或者用高精度的电子束曝光与图形依赖

氧化 (PADOX) 方法相结合来制备^[9,10]. 事实上, 在高掺杂的硅量子线中, 由于掺杂浓度的涨落, 或是由于刻蚀工艺造成的边缘粗糙不平可以形成隧穿势垒^[11,12]. 这样的势垒也会形成隧穿结, 电子在其中的传输也会呈现单电子效应和库仑阻塞效应. 如果采用顶栅来控制库仑岛中的电流, 需要将顶栅精确地置于量子线正上方, 通常需要采用电子束曝光的套刻, 并且对套刻的精度要求苛刻. 采用配以侧栅的量子线是一种很理想的器件构建方式, 因为侧栅和量子线可以在一次电子束曝光中形成, 不需要套刻, 可以大大简化器件的工艺流程.

本文在高掺杂的超薄绝缘体上硅薄膜 (silicon-on-insulator, SOI) 上构建双栅调制的硅基单电子晶体管, 并研究其中的单电子隧穿和库仑振荡现象. 在该器件结构中, 用 SOI 的硅衬底作为背电极, 与侧栅一起构成双栅电极, 通过在侧栅和背栅分别施加电压, 在低温下实现对单电子效应的调制.

2. 实验

为了制备这个器件, 实验中所采用 SOI 材料的顶层硅厚度为 100 nm, 埋层 SiO₂ 的厚度为 200 nm. 首先将顶层硅进行磷离子注入掺杂并高温退火. 离子注入的能量和剂量分别为 60 keV 和 5×10^{14}

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB932202) 和国家自然科学基金 (批准号: 60571008, 60721063) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: kjchen@nju.edu.cn

cm⁻²,通过所测方块电阻可以估算出掺杂浓度大约为 1×10^{19} cm⁻³. 为了将顶层硅减薄,采用多次氧化的方法,每次氧化后将氧化层用缓冲的 HF 溶液去除,最终将顶层硅减薄至 17 nm. 然后采用电子束曝光和剥离技术 (lift-off) 相结合的方法形成 Al 膜的图形. 其中曝光 PMMA 正型电子抗蚀剂的精细图形利用了电子束曝光中由于电子散射导致的临近效应^[13]. 利用 Al 膜的图形作掩蔽,采用反应离子刻蚀技术将图形转移到顶层硅上. 刻蚀使用的反应气体为 CHF₃ 和 O₂ 混合气体. 最后在热的磷酸溶液中去掉 Al 掩蔽并用标准的清洗工艺进行样品的清洗. 至此,实验得到的硅量子线大约有 17 nm 高,50 nm 宽,侧栅与纳米线之间的间隔小于 80 nm. 为了进一步减小硅量子线的尺寸,将样品在 900 °C 的条件下干氧化 20 min,最终得到的硅量子线大约有 10 nm 高,30 nm 宽,其扫描电子显微镜照片如图 1(a) 所示. 此后,采用标准的 CMOS 工艺制备 Al 电极,在氮气中退火形成欧姆接触. 采用 Agilent 4156C 精密半导体参数分析仪和 Lake Shore 低温探针台对器件进行变温的电学性能测量,测量温度范围为 5.4 K 到室温.

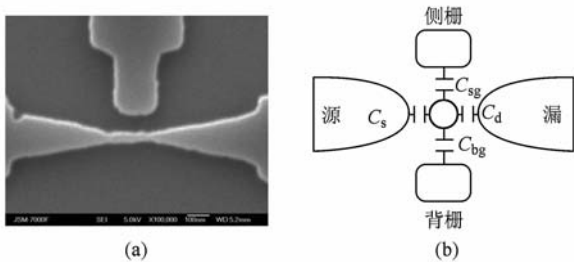


图 1 (a) 扫描电子显微镜照片, (b) 器件的等效电路示意图

3. 结果与讨论

图 1(b) 给出了器件的等效电路示意图,其中 C_s 和 C_d 是两个隧穿结电容, C_{sg} 和 C_{bg} 是两个栅电容. 栅电极通过电容与库仑岛进行耦合,在背栅和侧栅施加电压 V_{bg} 和 V_{sg} ,调节库仑岛中的费米能级,调制源漏电流. 为了研究量子线中的库仑阻塞效应,栅电极不加偏压,在不同温度下测量器件的电流-电压特性 ($I_{ds}-V_{ds}$). 测量时,源漏电压 V_{ds} 从 -0.1 V 扫描到 0.1 V,图 2 给出了源漏电流 I_{ds} 随 V_{ds} 的变化特征曲线. 从图中可以看出,在零偏置的情况下,室温下的 $I_{ds}-V_{ds}$ 特征曲线呈现线性的欧姆

特性,量子线电阻约为 50 MΩ. 随着测量温度的降低, $I_{ds}-V_{ds}$ 特征曲线由线性向非线性转化,量子线的阻值进一步增大. 在测量温度为 5.4 K 时,可以看到电流曲线呈明显的非线性特性. V_{ds} 在 -15—15 mV 范围内,电流几乎为零,说明此时电子的隧穿在很大程度上被抑制,源漏没有电子输运. 这主要是因为随着温度的降低,电子热运动能的影响越来越小,库仑阻塞效应越来越明显. 从 5.4 K 时的微分电导曲线 $G-V_{ds}$ (见图 2 内插图) 可以估计出库仑间隙大约为 30 mV.

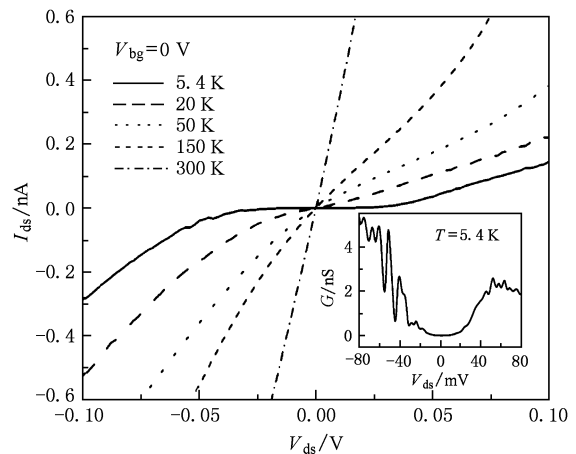


图 2 不同温度下的 $I_{ds}-V_{ds}$ 曲线 内插图为 $T = 5.4$ K 的微分电导曲线

为了研究量子线中的库仑振荡现象,侧栅浮空,测量 I_{ds} 随背栅压 V_{bg} 的变化特征曲线. 测量时, V_{ds} 的扫描范围为 -9.5—9.5 mV. 图 3(a) 给出的是器件在不同 V_{ds} 下的一组 $I_{ds}-V_{bg}$ 特征曲线. 从图中可以看出 I_{ds} 呈明显的周期性振荡,振荡的周期为 $\Delta V_{bg} = 0.4$ V. 根据该结果,可以估算出栅电容 $C_{bg} = e/\Delta V_{bg} = 0.4$ aF. 图 3(b) 给出了相应的微分电导 G 随 V_{ds} 和 V_{bg} 变化的二维灰度轮廓曲线图,其轮廓曲线呈现经典的菱形形状. 在菱形内部区域,由于库仑岛上被整数个电子所填充,它会阻碍下一个电子的隧穿,所有的传输也因为库仑阻塞而被抑制,所以几乎没有电流. 在菱形的外面会发生电子的隧穿跃迁. 菱形的大小由栅电容和总电容来决定,菱形两条边的斜率在数值上分别等于 C_d/C_{bg} 和 $-(C_s + C_d)/C_{bg}$ ^[14]. 根据图中的斜率,经计算可以得到两个隧穿结电容 C_s 和 C_d 的大小分别为 1.6 和 2.0 aF,器件的总电容 $C_{\Sigma} = C_s + C_d + C_{bg} = 4.0$ aF. 由此可以得出相应的电荷充电能 $E_c = e^2/2C_{\Sigma} = 20$ meV. 由于

所形成的库仑岛纵向尺寸小于横向尺寸,采用圆盘自洽电容公式 $C_{\text{self}} = 8\epsilon_0\epsilon_s r$, 其中 ϵ_0 是真空介电常数, ϵ_s 是相对介电常数, r 是圆盘的半径, 取 SiO_2 的相对介电常数为 3.9, 根据 $C_{\text{self}} = C_{\Sigma}$ 可以计算出库仑岛的尺寸为 30 nm, 这个值与量子线的宽度是一致的.

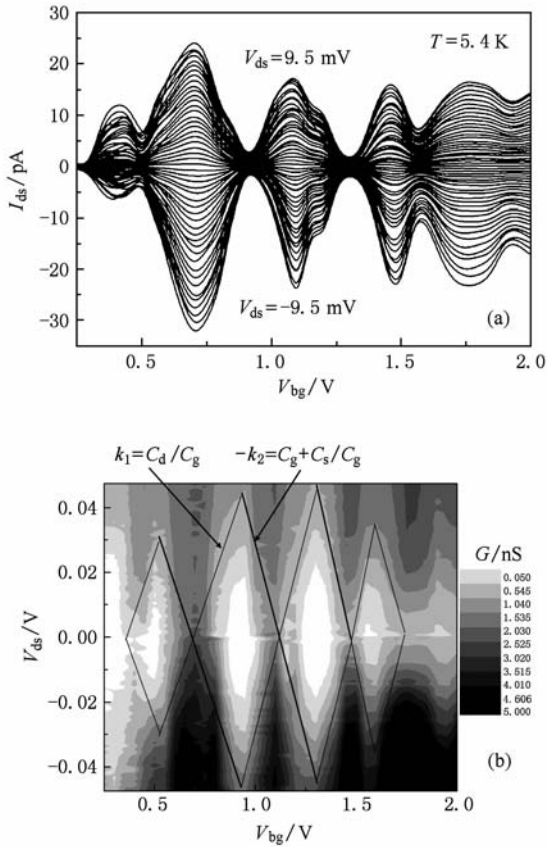


图3 (a) 不同 V_{ds} 下的源漏电流 $I_{\text{ds}}-V_{\text{bg}}$ 特性曲线, (b) 微分电导 G 随 V_{ds} 和 V_{bg} 变化的二维灰度轮廓曲线图

根据经典的正统理论,为了观测到库仑阻塞效应,库仑充电能 E_c 必须远大于电子的热运动能 $k_B T$, 其中 k_B 是玻尔兹曼常数. 假设条件 $E_c = e^2/2C_{\Sigma} > 3.5 k_B T$ 得到满足^[11,15], 我们可以推导出器件的库仑阻塞效应将在 50 K 以后逐渐消失. 为此, 固定 $V_{\text{ds}} = 10$ mV, 测量不同温度下的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{bg}}$ 特性曲线, 测量温度由 5.4 K 上升到 50 K. 图 4 中给出的是相应微分电导随 V_{bg} 变化的特征曲线. 随着温度的上升, 背栅压对沟道电流的调制作用越来越弱, 甚至库仑振荡现象在 50 K 时消失, 这个温度其实也是对应于观察到单电子效应的最大温度, 这与前面的分析是一致的. 同时, 由 V_{bg} 引起的 I_{ds} 振荡曲线所表现出来的周期性 (ΔV_g 约为 0.4 V) 与图 3(a) 的结果也是相符的.

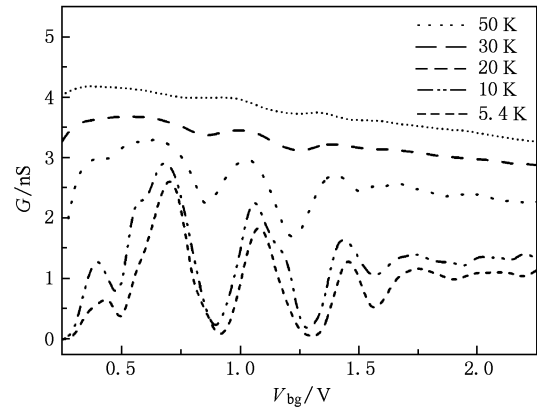


图4 微分电导 G -背栅压 V_{bg} 特征曲线随温度变化的依赖关系

测量分析了侧栅对沟道电流的调制作用. 首先在 $T = 5.4$ K 的情况下, 测量沟道电流 I_{ds} 随侧栅电压 V_{sg} 的变化关系曲线, 如图 5 所示. 在测量的过程中, V_{ds} 从 10 mV 逐渐增加到 90 mV, 从图中可以看到侧栅对沟道电流有明显的调制作用, I_{ds} 呈现周期性的库仑振荡现象. 尽管随着 V_{ds} 的增大, 峰值电流也相应增大, 但其周期性是单一的, 周期大约为 0.8 V.

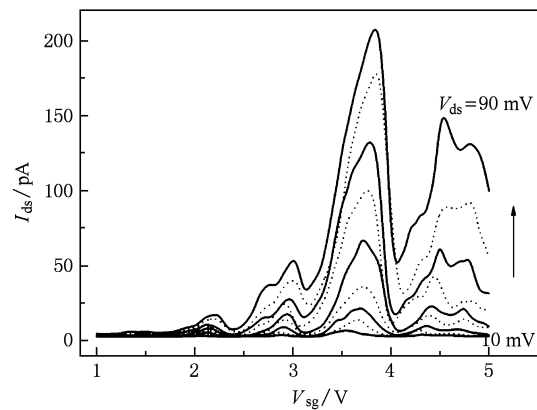


图5 不同 V_{ds} 下的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{sg}}$ 特性曲线

同时也研究了侧栅对沟道电流调制作用随温度的依赖关系. 固定 $V_{\text{ds}} = 10$ mV, 测量温度从 5.4 K 变到 80 K, 所测量的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{sg}}$ 特性曲线如图 6 所示. 从图中可以看出, 随着温度的上升, 侧栅电压对沟道电流的调制作用慢慢减弱, 库仑振荡一直到 80 K 消失, 振荡的周期与图 5 的结果保持一致.

对于重掺杂的硅可视为简并半导体, 费米能级在导带之上, 常温下量子线可以看做是导通的. 同时, 对于重掺杂的硅, 由于掺杂浓度的涨落, 导带有

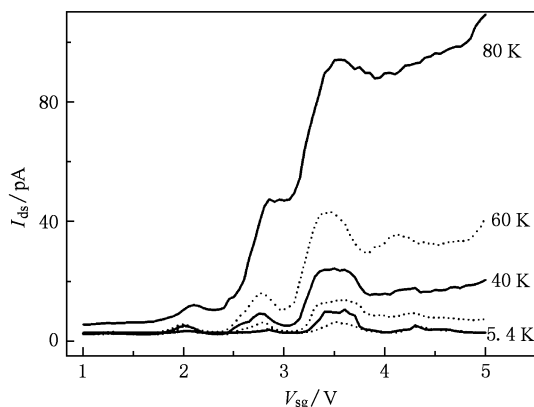


图6 $I_{ds}-V_{sg}$ 特性曲线随温度的依赖关系

一定的起伏. 在低温下, 费米能级下降到部分导带之下形成势垒, 这些势垒使得在量子线中形成库仑

岛和隧穿结. 因此在温度低到一定的程度, 也就是电子的热扰动能不足以对库仑充电能产生影响, 就可以观测到库仑阻塞效应. 同时, 栅压也可以对库仑振荡效应进行调制, 这主要是通过栅压改变岛中的费米能级形成电子发生隧穿的通道.

4. 结 论

为了在硅量子线中研究单电子隧穿和库仑阻塞效应, 在 SOI 材料上构建具有双栅结构的单电子晶体管. 通过在背栅和侧栅上施加电压, 分别观察到源漏电流呈现周期性的振荡特性, 并且这种振荡特性与温度有很大的依赖关系. 我们将这种现象归因于栅压改变岛中的费米能级形成电子发生隧穿的通道, 形成周期性的振荡.

- [1] Manoharan M, Oda S, Mizuta H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 112107
- [2] Yan W X, Zhao Y P, Wen Y B, Li X P, Xu L P, Gong J P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 027302
- [3] Wu F, Wang T H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 696 (in Chinese) [吴凡、王太宏 2003 物理学报 **52** 696]
- [4] Liu K, Ding H L, Zhang X G, Yu L W, Huang X F, Chen K J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7052 (in Chinese) [刘奎、丁宏林、张贤高、余林蔚、黄信凡、陈坤基 2008 物理学报 **57** 7052]
- [5] van der Wiel W G, de Franceschi S, Elzerman J M, Fujisawa T, Tarucha S, Kouwenhoven L P 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 1
- [6] Gorman J, Hasko D G, Williams D A 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 090502
- [7] Durrani Zahid A K 2003 *Physica E* **17** 572
- [8] Wang T H, Li H W, Zhou J M 2001 *Chin. Phys.* **10** 844
- [9] Fu Y, Willander M, Dutta A, Oda S 2000 *Superlattices and Microstructures* **28** 189
- [10] Takahashi Y, Namatsu H, Kurihara K, Iwamoto K, Nagase M, Murase K 1996 *IEEE Trans. Electron Dev.* **43** 1213
- [11] Tilke A T, Simmel F C, Blick R H, Lorenz H, Kotthaus J P 2001 *Progress in Quantum Electronics* **25** 97
- [12] Hu S F, Wong W Z, Liu S S, Wu Y C, Sung C L, Huang T Y, Yang T J 2002 *Adv. Mater.* **14** 736
- [13] Zhang X G, Chen K J, Fang Z H, Liu K, Cao C H, Kang L, Xu L 2008 *Chin. Patent* 200810020317.6 [2008-2-29]
- [14] Liu K T, Fujiwara A, Takahashi Y, Murase K, Horikoshi Y 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 458
- [15] Evans G J, Mizut H, Ahmed H 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 5837

Coulomb oscillations effect in dual gate controlled silicon nanowire*

Zhang Xian-Gao¹⁾ Fang Zhong-Hui¹⁾ Chen Kun-Ji¹⁾ † Qian Xin-Ye¹⁾
Liu Guang-Yuan¹⁾ Xu Jun¹⁾ Huang Xin-Fan¹⁾ He Fei²⁾

1) (*State Laboratory of Solid State Microstructures, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

2) (*Wuxi China Resources Huajing Micro Electronics Co. Ltd., Wuxi 214061, China*)

(Received 28 April 2010; revised manuscript received 29 May 2010)

Abstract

The tunable single electron effect and Coulomb oscillations were observed in Si nanowire transistors. By measuring the channel current as function of applied back-gate and side-gate voltage, the tunable single electron effect and Coulomb oscillations are investigated. From the differential conductance characteristics, the Coulomb diamonds are clearly observed due to the gate voltage-induced quantum dots formation in the Si nanowire.

Keywords: Coulomb oscillations, single electron effect, silicon nanowire

PACS: 73.23.Hk, 73.63.-b

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB932202) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60571008, 60721063).

† Corresponding author. E-mail: kjchen@nju.edu.cn