

耦合双量子点中基态电子的隧穿特性*

肖洁 施毅 熊诗杰 张荣 郑有炓

(南京大学物理系 固体微结构国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 介绍了以 Si/SiO₂ 系统构成的量子异或门的工作原理, 研究了耦合不对称双量子点所构成的量子比特的电子隧穿特性。研究结果表明, 通过栅压可很好地实现控制电子在两个量子点间共振隧穿, 其隧穿时间随势垒厚度和量子点尺寸结构参数发生显著的变化。目前模拟的特征变化曲线表明, 可获得实验上理想的隧穿时间(工作频率)和相应的栅压(工作电压)。

关键词: 量子比特; 隧穿时间; 量子点

PACC: 7320D; 7335C

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)01-0038-05

间的影响, 而隧穿时间决定着器件的工作频率。

1 引言

量子计算机正受到越来越广泛的关注, 人们从多个方面探索了其可能的物理实现方法^[1~13]。其中, 以半导体量子点为基础的固体量子计算机, 以其可基于现有的半导体技术, 及可规模集成的优越性能, 被认为更加可行^[14, 15]。Loss 和 DiVincenzo 于 1998 年首先提出量子点计算机方案^[7], Tanamoto 进一步提出基于现有硅工艺的耦合双量子点模型^[12], 用以实现量子异或操作。

在量子点系统中, 量子逻辑操作的载体是电子。电子必须在不同的量子点间进行跃迁, 因此对其隧穿特性的研究就必不可少^[16]。这些电子的状态强烈依赖于量子点的结构参数, 如势垒厚度以及量子点尺寸, 所以定量研究这些参数对电子态的影响将对实验上构造真正的量子器件起到重要的作用。本文以 Si/SiO₂ 系统为例, 首先对 Tanamoto 的双量子点结构的量子异或门模型进行了改进。接着, 对电子的隧穿时间进行了计算模拟, 着重讨论了势垒厚度和量子点尺寸的变化对工作电压(栅压)和电子隧穿时

2 结构和工作原理

图 1 虚线框内为由两个大小不等的 Si 量子点构成一个量子比特。如果两个量子点耦合比较强, 则两个量子点就像一个大量子点^[17~19]。由于库仑阻塞效应, 两个量子点上可以只有一个额外电子。把这个额外电子处在大量子点上的状态定义为|1>态, 而处在小量子点的状态定义为|0>态。假定体系处在极低温的情况下(接近 0 K), 电子只能分别处在两个量子点各自的基态上。由于两个量子点尺寸不同, 它们各自的基态能级也不相同。当两个基态在栅压的调控下达到相等时, 电子由于共振隧穿而会在两个量子点之间发生振荡。这样就实现了量子态的反转, 即“非”操作。

一个实际的量子计算机的基本逻辑元器件必须包括逻辑“非”和逻辑“异或”的操作。把上面提到的两个量子比特并排摆放就组成了一个量子异或门(图 1)。两个量子比特间有三个金属电极, 中间的一个始终接地, 上下两个是否接地由开关控制。如果三

* 国家自然科学基金(批准号: 90101021, 60290084), 国家重点基础研究专项经费(No. G001CB3095)资助项目

肖洁 男, 硕士, 现从事量子计算的研究。

施毅 男, 教授, 博士生导师, 从事微电子学和光电子学的研究。

2003-01-23 收到, 2003-04-11 定稿

©2004 中国电子学会

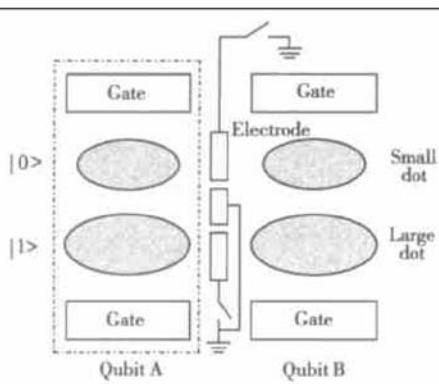


图 1 由两对耦合双量子点构成的一个量子异或门 虚线框内是一对耦合双量子点构成的一个量子比特. 电子的“0”和“1”态分别由电子处在大量子点和小量子点表示. 位于两个量子比特中间的是用来控制比特间耦合的三个电极.

Fig. 1 A quantum C-NOT gate constructed by two pairs of the two-coupled quantum dots (QDs) that from a qubit (in dashed pane). The “0” and “1” states of electron are denoted by the position where electron in large QD and in small QD respectively. The electrodes used here control the coupling of the two qubits.

个电极全部接地, 则两个量子比特互不影响, 各自独立. 如果上下两个开关都打开, 则两个量子比特发生耦合, 并且一个量子比特中的电子只能影响相邻平行量子点上的电子. 因为有中间金属电极的阻挡, 四个量子点之间不会发生交叉影响. 图 2 进一步说明了量子异或操作的过程: 当 A, B 两个量子比特发生耦合时, 如果此时 A 中的电子处于 $|1\rangle$ 态, 即处在大量子点上, 那么 A 中的电子由于库仑作用将抬升 B 中大量子点的电子的基态能级(抬升 $\Delta U = e^2/\epsilon\epsilon_0 r$, ϵ 是 Si/SiO₂ 系统的相对介电常数, 取为 4^[12], r 是两个相邻量子比特间的距离. 如 r 为 20nm, 则抬升能量约为 18meV). 同时, 在量子比特 B 上加上一定的栅压 V_G 并持续一定的时间(让 B 中电子发生态的反转所需的时间), 最终导致 B 中大小量子点的基态能级对齐, B 中电子由于共振隧穿将从一个量子点隧穿到另一个量子点. 图中 V_d 是栅压 V_G 和相邻电子共同作用的结果. 相应地, 如果 A 中电子处在 $|0\rangle$ 态, 即小量子点上, 如图 2 所示, 即使此时 B 上再加上相同的栅压 V_G , B 中的电子依然会保持原来的状态. 所以, 只有 A 处在 $|1\rangle$ 态时, B 的状态才会反转, 即图 1 的结构可以实现量子异或操作.

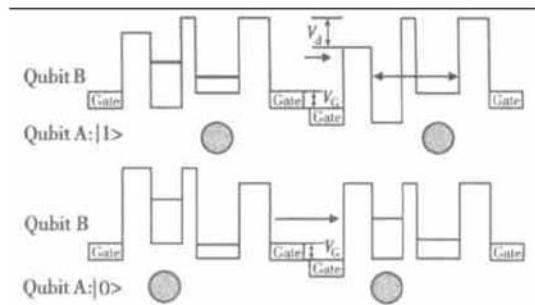


图 2 量子异或的操作过程 当量子比特 A 处于 “1”态时会抬升比特 B 中大量子点上的电子能级, 使得比特 B 中大小量子点上的能级趋于一致, 量子比特 B 中的电子将由于来自比特 A 和栅压 V_G 的共同作用而共振隧穿(上图). 而当量子比特 A 处于 “0”态时会进一步拉大量子比特 B 中大小量子点间的能级差, 此时比特 B 中的电子在栅压 V_G 的作用下将不发生态的反转(下图).

Fig. 2 Process of C-NOT operations. The potential of the large dot in qubit B will be raised and close to that of the small dot due to the effect of the Coulomb repulsion from qubit A and the gate voltage V_G when the qubit A is in “1” state (upper). However, when qubit A is in “0” state, the potential gap between two dots in qubit B will increase due to the Coulomb repulsion from qubit A and the state of qubit B will not reverse as the same value of V_G is applied (below).

3 数值计算结果和讨论

为了简单起见, 这里采用了如图 3 所示的一维势来研究电子在两个量子点之间的隧穿情况. 当一个量子比特与周围的量子比特不发生耦合且栅压 V_G 为零时, V_d 也等于零. 当 V_d 被调节到一个适当的数值, 电子将在两个量子点间来回振荡. 我们通过解如图 3 所示的不对称量子阱的薛定鄂方程, 来研究电子在大小两个量子点间的隧穿时间以及相应的

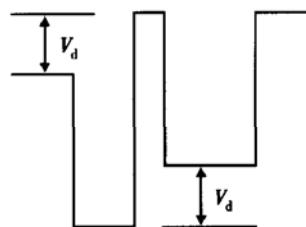


图 3 简化的一维不对称双量子阱

Fig. 3 Schematic of the simplified one-dimensional potential in a qubit

V_d 的值. 首先假定大小量子点的尺寸分别为 6 和 4nm, 势垒厚度为 1.5nm, 高度为 3.1eV (SiO₂ 势垒). 考虑到电子在 Si 和 SiO₂ 中的有效质量不同, 电子波函数的边界条件应当是: $\Psi(x_1) = \Psi(x_2)$, $\frac{\Psi'(x_1)}{m_1} = \frac{\Psi'(x_2)}{m_2}$; $m_1 = 0.19m_e$, $m_2 = 0.38m_e$ 分别是电子在 Si 和 SiO₂ 中的有效质量 (m_e 为电子的静质量).

图 4(a) 表示了 V_d 等于零时的电子波形. 当 V_d 被调到约 45mV, 大小量子点的基态能级对齐时, 简并的能级分裂成两个新的能级: 较低的偶宇称态(图 4(b))和较高的奇宇称态(图 4(c)). 原先的电子波函数将是这两个新基态的线性叠加. 这是一个非定态, 电子将在两个量子点间来回振荡(图 4(d)), 从图 4(d) 中可以读出隧穿时间是 26ps.

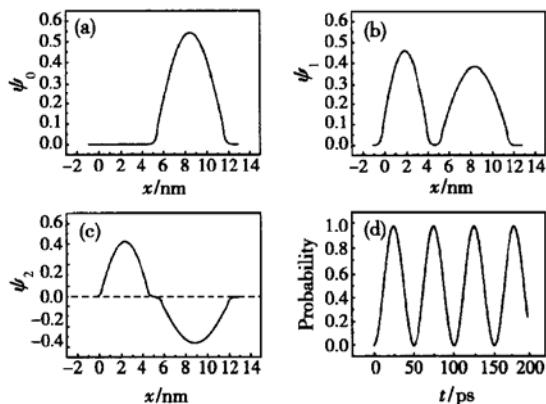


图 4 (a) $V_d = 0$ 时计算得到的电子波形; (b), (c) $V_d = 45$ mV 时, 新分裂产生的偶宇称态和奇宇称态; (d) 电子在小量子点上的几率振荡

Fig. 4 (a) Calculated wave function of electron in large dot at $V_d = 0$; (b) and (c) Wave functions of lower energy level (even parity) and higher energy level (odd parity) at $V_d = 45$ mV, respectively; (d) Probability of electron in small dot as a function of time

在实验上, 可以通过调节势垒厚度和量子点大小来获得理想的隧穿时间以得到适当的工作频率. 图 5 所示就是隧穿时间和 V_d 随势垒厚度的变化关系. 从图中可以看出, 当势垒厚度超过 1 nm 后, V_d 就不再变化了, 这是因为两个量子点耦合已经很弱. 而隧穿时间在势垒从 0.5 变到 2nm 时, 呈指数变化, 范围从 0.1 到 411ps. 由此可见, 势垒厚度作些许变化时, 隧穿时间会有横跨四个数量级的变化范围. 势垒厚度是一个影响电子隧穿性质的重要参数,

它直接影响着两个量子点的耦合强度. 随着势垒的逐渐变厚, 耦合越来越弱, 两个新产生的奇偶态的能级分裂 ΔE 也越来越小, 而隧穿时间(约为 $\hbar/\Delta E$)自然就随之增大了. 需要强调的是, 此处电子是共振隧穿, 不同于一般的直接隧穿或 FN 隧穿^[16]. 一般的量子点之间的电子隧穿时间由电子的能量、势垒厚度和高度决定, 最小也在纳秒量级. 从目前的计算结果可以清楚地看到共振隧穿的时间比之要小 1~4 个数量级.

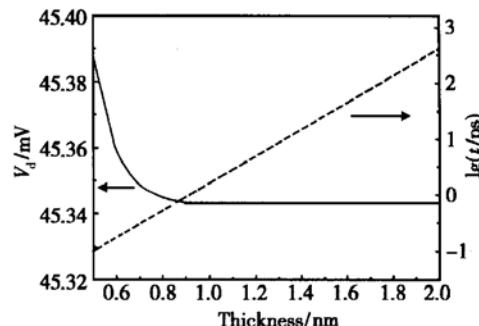


图 5 V_d 和隧穿时间 t 的对数随势垒厚度的变化

Fig. 5 Calculated V_d and the logarithm of the tunneling time t as functions of the barrier thickness

以上结果是在固定大小量子点的尺寸为 6 和 4nm 的情况下得出的. 当我们固定势垒厚度为 1.5nm 和大量子点尺寸 6nm 而改变小量子点大小时, 就得到了如图 6 所示的变化关系. 横坐标表示小量子点同大量子点的尺寸比. 由于小量子点的基态能级随着小量子点尺寸的变大而一步步地降低, 使得 V_d 需要不断地调大以使大小量子点的基态能级

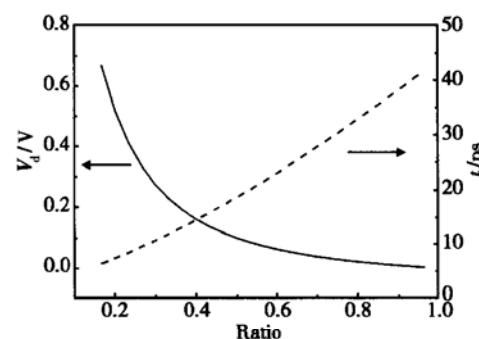


图 6 V_d 和隧穿时间 t 随小量子点尺寸的变化曲线 横坐标是小量子点同大量子点的尺寸之比.

Fig. 6 Calculated V_d and tunneling time t as functions of the size of the small dot. The abscissa is defined as the ratio of the size of the small dot to that of the large dot.

对齐. 相应的隧穿时间也有几十个皮秒的变化, 但没有势垒厚度带来的变化显著. 总之, 电子的隧穿特性可以通过实验上可调的参数(势垒厚度和量子点大小)进行调节, 并且我们通过定量分析得出了它们之间的变化关系, 这是一个值得关注的结果.

需要注意的是, 实际的器件应工作在极低的温度下, 以尽量保持量子态的相干性. 但即使是0K下, 声子散射依然无法避免. 在此环境温度下, 主要是声学声子起作用, 光学声子会被抑制. 随着量子点尺寸的减小, 电子能级间距会进一步拉大, 从而低能级的电子借助声学声子跃迁到高能级的概率将十分小, 但高能级的电子会弛豫到低能级, 正是这一机制成为退相干的主要因素. 退相干时间大约是 10^{-7} 秒的量级^[13], 是我们所计算的隧穿时间的 10^4 倍. 所以, 电子在丧失量子相干性前, 完全可以完成所需的计算.

目前, 关于量子计算的理论已比较完善, 实现量子异或门没有物理上的困难. 但最大的困难是在技术上如何实现量子态之间的纠缠(相干性)以及如何保持这种纠缠. 至今仍然没有在实验上实现基于量子点的量子计算.(实验上已实现的有基于光子, 核磁共振, 和离子阱的量子计算, 用于验证量子计算理论的正确性, 但这些都不具有如量子点那样可集成的应用前景.)而且, 要使量子计算机的性能超越现有的经典计算机, 至少需要纠缠上百个量子比特(如果加上量子纠错码, 则至少需要上万个纠缠态), 这对现有技术条件是个巨大的挑战.

4 结论

我们通过对已有的半导体量子点结构量子比特模型^[12, 13]的改进和进一步的定量分析, 着重研究了电子在尺寸大小不等的两个耦合量子点之间的隧穿特性, 得出了一些实验上可调的结构参数, 如势垒厚度和量子点尺寸对电子隧穿的影响关系, 从中可以获得合适的器件工作电压和工作频率. 这些理论计算得出的结果必然对将来实际构造量子逻辑器件有所帮助.

参考文献

- [1] Cirac J I, Zoller P. Quantum computation with cold trapped ions. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 4091
- [2] Imamoglu A, Awschalom D D, Burkard G, et al. Quantum information processing using quantum dot spins and cavity QED. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 4204
- [3] Mizel A, Mitchell M W, Cohen M L. Scaling considerations in ground-state quantum computation. *Phys Rev A*, 2002, 65: 022315
- [4] Engel H A, Recher P, Loss D. Electron spins in quantum dots for spintronics and quantum computation. *Solid State Commun*, 2001, 119: 229
- [5] Averin D V. Adiabatic quantum computation with Cooper pairs. *Solid State Commun*, 1998, 105: 659
- [6] Ladd T D, Goldman J R, Yamaguchi F, et al. All-silicon quantum computer. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 017901
- [7] Loss D, DiVincenzo D P. Quantum computation with quantum dots. *Phys Rev A*, 1998, 57: 120
- [8] Brown K R, Lidar D A, Whaley K B. Quantum computing with quantum dots on quantum linear supports. *Phys Rev A*, 2002, 65: 012307
- [9] Pazy E, D'Amico I, Zanardi P, et al. Storage qubits and their potential implementation through a semiconductor double quantum dot. *Phys Rev B*, 2001, 64: 195320
- [10] Barenco A, Deutsch D, Ekert A, et al. Conditional quantum dynamics and logic gates. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 4083
- [11] Openov L A. Resonant electron transfer between quantum dots. *Phys Rev B*, 1999, 60: 8798
- [12] Tanamoto T. Quantum gates by coupled asymmetric quantum dots and controlled-NOT-gate operation. *Phys Rev A*, 2000, 61: 022305
- [13] Wu N J, Kamada M, Natori A, et al. Quantum computer using coupled-quantum-dot molecules. *Jpn J Appl Phys*, 2000, 139 (7B): 4642
- [14] Zhitenev N B, Brodsky M, Ashoori R C, et al. Localization-delocalization transition in quantum dots. *Science*, 1999, 285: 715
- [15] Oosterkamp T H, Fujisawa T, Van der Wiel W G, et al. Microwave spectroscopy of a quantum-dot molecule. *Nature*, 1998, 395: 873
- [16] Feng Wenxiu, Chen Pusheng, Huang Shiping. Temperature dependence of electron tunneling and low field transport current in ultrathin SiO₂ films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1998, 19(10): 777(in Chinese) [冯文修, 陈蒲生, 黄世平. 超薄 SiO₂ 膜电子隧穿及低场传输电流的温度关系. 半导体学报, 1998, 19(10): 777]
- [17] Crouch C H, Livermore C, Westervelt R M, et al. Evolution of the Coulomb gap in tunnel-coupled quantum dots. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 817
- [18] Xiong S J, Xiong Y. Resonant transmission through a quantum dot in the Coulomb blockade regime. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 1407
- [19] Waugh F R, Berry M J, Mar D J, et al. Single-electron charging in double and triple quantum dots with tunable coupling. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 705

Characteristics of Electron Tunneling Based on Two-Coupled Quantum Dot System^{*}

Xiao Jie, Shi Yi, Xiong Shijie, Zhang Rong and Zheng Youdou

(Department of Physics & National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The characteristics of an excess electron tunneling in a qubit based on the two coupled quantum dots in Si/SiO₂ system is investigated. Two of these qubits could realize quantum Controlled-Not gate. The simulated results demonstrate that the state and transfer of an excess electron in the coupled dots could well be controlled by external gate voltage with pulse time, which allows for being adjusted by the structure parameters, such as barrier thickness and dot size, of the dot system through experimental operation. It should be practically helpful for making quantum computer.

Key words: qubit; tunneling time; quantum dot

PACC: 7320D; 7335C

Article ID: 0253-4177(2004)01-0038-05

* Project supported by Special Funds for Major State Basic Research Project of China (No. G001CB3095) and National Natural Science Foundation of China (Nos. 90101021, 60290084)

Xiao Jie male, master graduate student. He is engaged in research on quantum computation.

Shi Yi male, professor. He is engaged in research on microelectronics and photoelectronics.

Received 23 January 2003, revised manuscript received 11 April 2003

© 2004 The Chinese Institute of Electronics