

一种电子-核子双自旋固体量子计算机实现方案*

龙桂鲁^{1,2,3} 马英俊^{1,2} 陈皓明¹

(1 清华大学物理系, 北京 100084)

(2 量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100084)

(3 清华大学原子分子纳米研究中心, 北京 100084)

摘要: 提出了一种利用电子-核子自旋的半导体量子计算机实现方案. 通过扫描隧道显微镜的针尖实现单个比特的寻址、操作以及任意两个比特之间的受控非门操作. 方案中所涉及到的技术是目前已有的或者是接近于现有的技术水平. 所提出的方案有可能利用现有的技术来实现.

关键词: 电子-核子自旋量子计算机; 扫描隧道显微镜; 硅基半导体

PACC: A7335 **EEACC:** B2550N **CCACC:** C4270

中图分类号: TP387 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)S0-0043-04

1 引言

量子计算机现在已经成为国际上的研究热点. 量子计算机研究中的核心问题是如何构造量子计算机. 人们需要找一个二能级量子系统作为量子比特, 这种量子比特要能操纵, 能完成单个比特旋转和二个比特的控制非逻辑门操作. 同时, 这个系统要具备强大的抗错能力以及相当长的退相干时间, 以确保足够多的量子操作能够在量子态消失之前完成. 迄今为止, 提出了很多的方案, 如液态核磁共振、离子阱、腔量子电动力学、超导约瑟夫逊结量子比特、量子点、固体中的核自旋量子比特、液晶晶格中的核自旋量子比特、光量子比特、电子自旋量子比特、磁力扫描显微镜等等一系列的方案^[1~13].

核自旋可以与环境很好地隔离, 它们的相干时间通常都很长. 另一方面, 现代的纳米技术有了充分的发展, 使得这类固体量子器件的制作成为可能. 在 Kane 提出的固态方案中^[7], 在²⁸Si 中掺杂³¹P 原子就

充分利用了的这两种优势, 其中³¹P 核自旋为 1/2, 作为量子比特; ²⁸Si 核自旋为 0. 利用外加磁场和射频场来完成量子逻辑操作. 这一方案已有很多的研究^[14~18]. 在 Kane 提出的方案中, 其重要的特点就是需要对 P 离子进行原子量级的精确定位以及对自旋测量进行精密的设计. 就目前的技术而言, 还达不到这种要求. 为解决这一困难, 2001 年 Berman 等人提出一种方案, 不需要如此高的精度^[12,13,19]. 但是在本方案中, 仍然需要通过相邻的核自旋的单极子相互作用来实现. 而这是比较困难的, 如果小, 则不能实现受控非门, 如果大, 则次相邻的比特间的相互作用很强, 产生很强的干扰.

扫描隧道显微镜 (STM) 是上个世纪 80 年代由 Binnig 和 Rohrer 发明的^[20], 已成为广为人知、用途广泛的技术. 在 1990 年, Eigler 和 Schweizer 利用 STM 完成了对单原子的操纵^[21]. STM 能把一个原子或者一个分子从一个地方垂直拿起, 然后把它们放在另一个地方^[22,23]. 它也能够不脱离表面, 通过推、拉或机械滑动等形式操纵单原子^[24]. STM 能通

* 国家自然科学基金和国家重点基础研究发展规划 (No. 001CB309308) 资助项目

龙桂鲁 男, 1962 年出生, 教授, 博士生导师, 从事量子计算、量子通讯等研究.

马英俊 男, 1979 年出生, 硕士生, 从事量子计算、量子博弈等研究.

陈皓明 男, 1947 年出生, 教授, 博士生导师, 从事扫描隧道显微镜、新材料合成和固体表面薄膜研究.

过针尖诱导交换过程从 Ag(110)中萃取出原子^[25], 它甚至能在室温下操纵原子^[26,27]. 目前,STM 的空间尺度已经达到纳米量级. 最近,STM 的实验表明,通过隧穿电流的变化,可以探测单个电子的自旋^[28,29].

本文提出了电子和核子双自旋固态量子计算机,它利用扫描隧道显微镜探针作单量子比特寻址构成逻辑非门操作以及最后的量子态测量. 与以前的固态量子计算机方案不同,在我们的方案中,不依赖相邻核之间的偶极相互作用,因此,两相邻量子比特的距离可以很大. 同时,它也具有构造时不需要原子量级的精度,而且也能进行单自旋探测的优点.

2 电子-核子双自旋量子计算机方案

P 原子阵列被放置在纯²⁸Si 表面. P 核自旋作为量子比特,沿 z 轴方向有很强的外磁场. 纯²⁸Si 晶体各向同性,且核自旋为 0, P 核自旋为 1/2. 在低温下,施主电子可以认为被 P 离子束缚在其周围,它被用来操纵量子比特. 施主电子波函数从³¹P 核可延展到大约几到几十 nm,这使得量子比特寻址变得容易. 由于相邻施主间的距离很大,约 30nm,这样,它们之间的偶极相互作用就可以忽略. 在 STM 利用碳纳米管探针上,探针的顶端是一个¹³C 原子. 目前的技术完全可以制造这种探针. 碳纳米管本身可以是做成导电的,可以产生隧穿电流,同时针头上的¹³C 原子核的 1/2 自旋可以用来进行两个不同地点的手控非门操作. 为了消除环境对施主体系的影响,这个装置应放置在低温环境中. 在外磁场作用下,核和电子自旋都有塞曼分裂. 其中,电子的自旋向下为基态,而 P 核和¹³C 核自旋向上为基态,我们用 $|0\rangle$ 表示基态,用 $|1\rangle$ 表示激发态. 在作量子计算之前,必须先将所有的量子比特初始化,使之处于基态. 这需要两步,不像 Kane 的模型需要把装置放在极低的温度(mK),我们不需要如此低的温度,只需大约 1K 的温度. 在此温度下,所有的电子已经几乎被完全极化. 选 P 的核自旋作为量子比特. 核自旋在此温度下尚未完全极化,可以通过 STM 探测检查量子比特的状态,并使用脉冲来使量子计算机完全初始化. 如果量子比特处于 $|1\rangle$ 态,那么用一个 π 脉冲,使之发生翻转,成为 $|0\rangle$ 态. 初始化之后,所有的量子比特都处于 $|0\rangle$ 态,电子以及¹³C 核自旋也都处于 $|0\rangle$ 态.

3 ENDOS 量子计算机中的态测量、单比特与受控非门操作

没有探针时,电子和核自旋体系的哈密顿量可写作^[30]:

$$H_{e-p} = g_e \mu_B B S_z - g_n^p \mu_n B I_z^p + h A_z S_z I_z^p \quad (1)$$

当 STM 探针靠近 P 离子,例如距离为 1nm,那么,针尖¹³C、电子、及 P 离子组成的体系哈密顿量可写作:

$$H_{a-e-p} = g_e \mu_B B S_z - g_n^p \mu_n B I_z^p + h A_z S_z I_z^p - g_n^a \mu_n B I_z^a + h A S_z I_z \quad (2)$$

上式中的各个超精细相互作用常数应该通过实验来测得其具体的值,其估算值 A' 应为数 GHz,而 A'_z 为数十 MHz,在没有探针时, A_z 约为 120MHz^[31]. 为完成单比特翻转操作,我们将探针靠近这个量子比特,距离约为 10nm. 由于¹³C 处于基态,电子自旋也处于基态,因此,可以知道这个量子比特的共振频率为:

$$h\omega'_i = g_n^i \mu_n B - \frac{1}{2} h A'_z \quad (3)$$

这与没有探针时的共振频率是不一样的. 在此处,探针扮演着与 Kane 模型中 A 门相同的角色. 由于核自旋的变化引起 STM 隧穿电流变化,这使得单个核自旋能被探测. 因为¹³C 处于基态,由³¹P 核自旋引发的电子隧穿电流的频率变化如下式:

$$f_{e,p} = 0 = g_e \mu_B B - \frac{1}{2} h A' + \frac{1}{2} h A'_z, \quad \text{31P 自旋向上} \quad (4)$$

$$f_{e,p} = 1 = g_e \mu_B B - \frac{1}{2} h A' - \frac{1}{2} h A'_z, \quad \text{31P 自旋向下} \quad (5)$$

单比特测量是非常必要的,它能读出量子计算的结果. 此外,也能用来使¹³C 置于基态. 现在,我们就来讨论两比特控制非门. 在做任何量子门操作前后,探针顶部的¹³C 以及施主电子都应处于基态. 假设控制比特处于 $\alpha' |0\rangle_c + \beta' |1\rangle_c$ 态,目标比特处于 $\alpha |0\rangle_t + \beta |1\rangle_t$ 态,控制非逻辑门的操作应使之变为 $\alpha' |0\rangle_c (\alpha |0\rangle_t + \beta |1\rangle_t) + \beta' |1\rangle_c (\alpha |1\rangle_t + \beta |0\rangle_t)$ 态. 这样一个门需要 7 步构成,这个过程包括利用电子及核自旋的共振脉冲将控制比特、相应电子、¹³C 核自旋、目标比特及相应电子纠缠在一起;还包括利用另外的脉冲序列将¹³C 核自旋、电子去纠缠. 核自旋

共振由电子自旋来调制,而电子自旋共振频率由 ^{13}C 核自旋、 ^{31}P 核自旋来调制.这7步操作如下:

(1)将探针靠近控制比特,用一个频率 $f_{e,p} = 0 = g_e \mu_B B - \frac{1}{2} h A' - \frac{1}{2} h A'_z$ 的电子 π 脉冲,使电子和控制比特相纠缠.

(2)给针尖一个频率为 $F_a = |g_n^a| \mu_N B + \frac{1}{2} h A'$ 的脉冲,使针尖 ^{13}C 也纠缠在一起.

(3)将探针移向目标比特,运用两个电子 π 脉冲使得在探针处于 $|1\rangle$ 态条件下,目标比特相应的电子发生翻转,这两个 π 脉冲的频率分别为:

$$F_{et1} = g_e \mu_B B + \frac{1}{2} h A' - \frac{1}{2} h A'_z \quad (6)$$

$$F_{et0} = g_e \mu_B B + \frac{1}{2} h A' + \frac{1}{2} h A'_z \quad (7)$$

(4)将频率为 $F_p = g_n^p \mu_N B - \frac{1}{2} h A'_z$ 的 π 脉冲作用到目标比特上.

到此为止,已经完成了控制非门的逻辑操作,但是探针和电子还处于纠缠状态,接下来就需要对它们进行去纠缠操作.

(5)重复前面的第(3)步,对目标比特的电子进行去纠缠.

(6)再将探针从目标比特移向控制比特,重复第二步中的脉冲,探针 ^{13}C 被去纠缠.

(7)重复第一步,对控制比特的电子去纠缠.

在量子计算机中,利用单比特操作及控制非门操作可以完成所有的量子计算^[32].我们这种方案的最大优点就在于可以很容易对任意两个量子比特进行控制非逻辑门操作.典型的核磁共振脉冲时间是微妙量级,如果电磁波振幅越大,脉冲宽度就越窄.核磁共振的脉冲操作时间约为 $1\mu\text{s}$,将STM针头从一处移到另一处的时间,以现在的速度大约是 $15\mu\text{s}$.如果去相干时间是 1s ,则能够完成 10^5 的操作,足以完成一般的量子计算任务.

4 小结

随着集成电路的密度增加,一方面需要考虑量子效应^[33],另一方面则可以利用量子效应进行量子计算.本文提出了一个电子和核子双自旋量子计算机方案.在这一方案中,基本的逻辑门操作以及单比特的测量都能用STM探针来完成.本文明确地给出了单比特操作过程,详细地给出了双比特受控非

门的量子逻辑门过程.这个方案在目前的技术条件下是有可能达到.

致谢 作者感谢与李志坚先生、陈培毅教授、刘泽文教授的有意义的讨论.

参考文献

- [1] Cory D G, Fahmy A F, Havel T F. Ensemble quantum computing by NMR spectroscopy. Proc Natl Acad Sci USA, 1997, 94: 1634
- [2] Gershenfeld N, Chuang I. The usefulness of NMR quantum computing. Science, 1997, 275: 350
- [3] Cirac J I, Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions. Phys Rev Lett, 1995, 75: 4091
- [4] Monroe C, Meekhof D M, King B E, et al. Demonstration of a fundamental quantum logic gate. Phys Rev Lett, 1995, 75: 4714
- [5] Makhlin Y, Schon G, Shnirman A. Quantum-state engineering with Josephson-junction devices. Rev Mod Phys, 1997, 68: 733
- [6] Loss D, DiVincenzo D P. Quantum computation with quantum dots. Phys Rev, 1998, A57: 120
- [7] Kane B E. A silicon-based nuclear spin quantum computer. Nature, 1998, 393: 133
- [8] Yamaguchi F, Yamamoto Y. Crystal lattice quantum computer. Microelectron Eng, 1999, 47: 273
- [9] Knill E, Laflamme R, Milburn G J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. Nature, 2001, 409: 46
- [10] DiVincenzo D P. 2-bit gates are universal for quantum computation. Phys Rev, 1995, A51: 1015
- [11] Harneit W. Fullerene-based electron-spin quantum computer. Phys Rev, 2002, A65: 032322
- [12] Berman G P, Brown G W, Hawley M E, et al. Solid-state quantum computer based on scanning tunneling microscopy. Phys Rev Lett, 2001, 87: 097902
- [13] Berman G P, Doolen G D, Hammel P C, et al. Magnetic resonance force microscopy quantum computer with tellurium donors in silicon. Phys Rev Lett, 2001, 86: 2894
- [14] O'Brien J L, Schofield S R, et al. Towards the fabrication of phosphorus qubits for a silicon quantum computer. Phys Rev, 2001, B64: 161401
- [15] Berman G P, Kamenev D I, Tsifrionovich V I. Perturbation approach for a solid-state quantum computation. 2001, eprint-quant-ph/0110069
- [16] Hu Xuedong, De Sousa R, Das Sarma S. Decoherence and dephasing in spin-based solid state quantum computers. 2001, eprint-cond-mat/0108339
- [17] Koiller B, Hu Xuedong, Das Sarma S. Exchange in silicon-based quantum computer architecture. Phys Rev Lett, 2002, 88: 027903

- [18] Kane B E. Silicon-based quantum computation. *Fort Phys*, 2000,48:1023
- [19] Berman G P, Doolen G D, Hammel P C, et al. Solid-state nuclear-spin quantum computer based on magnetic resonance force microscopy. *Phys Rev*, 2000, B61:14694
- [20] Binnig G, Rohrer H, Gerber Ch, et al. Tunneling through a controllable vacuum gap. *Appl Phys Lett*, 1982, 40:178
- [21] Eigler D M, Schweizer E K. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature*, 1990, 344:524
- [22] Bartels L, Meyer G, Rieder K H. Basic steps of lateral manipulation of single atoms and diatomic clusters with a scanning tunneling microscope tip. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 697
- [23] Gimzewski J K, Joachim C. Nanoscale science of single molecules using local probes. *Science*, 1999, 283:1683
- [24] Meyer G, Bartels L, Zophel S, et al. Controlled atom by atom restructuring of a metal surface with the scanning tunneling microscope. *Phys Rev Lett*, 1997, 78:1512
- [25] Schulz J J, Koch R, Rieder K H. New mechanism for single atom manipulation. *Phys Rev Lett*, 2000, 84:4597
- [26] Cuberes M T, Schlittler R R, Gimzewski J K. Room-temperature repositioning of individual C-60 molecules at Cu steps: operation of a molecular counting device. *Appl Phys Lett*, 1996, 69:3016
- [27] Fishlock T W, Oral A, Egdell R G, et al. Manipulation of atoms across a surface at room temperature. *Nature*, 2000, 404:743
- [28] Manassen Y, Mukhopadhyay I, Ramesh Rao N. Electron-spin-resonance STM on iron atoms in silicon. *Phys Rev*, 2000, B61:16223
- [29] De La Broise X, Delerue C, Lannoo M, et al. Theory of scanning tunneling microscopy of defects on semiconductor surfaces. *Phys Rev*, 2000, B61:2138
- [30] Slichter C P. Principles of magnetic resonance. Berlin: Springer-Verlag, 1990
- [31] Feher G. Electron spin resonance experiments on donors in silicon(I); Electronic structure of donors by the electron nuclear double resonance technique. *Phys Rev*, 1959, 114: 1219
- [32] Barenco A, Bennett C H, Cleve R, et al. Elementary gates for quantum computation. *Phys Rev*, 1995, A52:3457
- [33] Ma Yutao, Li Zhijian, Liu Litian. MOS device threshold voltage model considering quantum mechanical effect including multi-subband occupation. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(3): 219 (in Chinese) [马玉涛, 李志坚, 刘理天. 包含多子带结构的 MOS 器件开启电压量子力学效应修正模型. *半导体学报*, 1999, 20(3):219]

A Solid-State Quantum Computer Scheme Using Electron-Nucleon Double Spins^{*}

Long Guilu^{1,2,3}, Ma Yingjun^{1,2} and Chen Haoming¹

(1 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Key Laboratory for Quantum Information and Measurements, Ministry of Education of China, Beijing 100084, China)

(3 Center of Atomic and Molecular Nanosciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A solid-state quantum computer scheme using electron-nucleon double spins is proposed. The addressing of qubit, single qubit operation and the control-not gate between any two qubits are realized by using an STM tip. The technique involved in this scheme is either current available or very close to the present technical expectation. Thus the scheme may be realized using existing technologies.

Key words: electron-nucleon double spin quantum computer; scanning tunneling microscope; silicon-based semiconductor

PACC: A7335 **EEACC:** B2550N **CCACC:** C4270

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0043-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China and Developing Program of Major State Basic Research Projects (No. 001CB309308)

Long Guilu male, was born in 1962, professor. Current research interests: quantum computers and quantum communication.

Ma Yingjun male, was born in 1979, master graduate student. Research interests: quantum computer and quantum games.

Chen Haoming male, was born in 1947, professor. Research interests: scanning tunneling microscope, surfaces of solid and new material.