

# 固态量子计算的若干重要物理问题研究\*

李树深<sup>†</sup> 吴晓光 郑厚植

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 量子计算机拥有比经典计算机更为强大的计算能力. 人们普遍认为量子计算机最终将会在固态系统中实现. 文章介绍了一些有关固态量子计算的研究进展, 其中包括超导电荷量子比特方案、几何量子计算、量子点量子比特及量子计算若干基本问题研究. 最后给出了固态量子计算的发展趋势.

**关键词** 量子信息, 固态量子计算, 综述, 量子比特

## Recent progress in solid-state quantum computing

LI Shu-Shen<sup>†</sup> WU Xiao-Guang ZHENG Hou-Zhi

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** Quantum computers may provide much greater computing power than classical computers. It is widely believed that quantum computers will ultimately be realized in solid-state systems. We review the latest progress in solid-state computing: superconducting charge qubits, geometric quantum computing, semiconductor quantum dot qubits, and various basic problems in quantum computing. The review concludes with an outline of future research on solid-state quantum information.

**Key words** quantum information, solid state quantum computing, review, qubit

### 1 超导电荷量子比特方案

光学微腔、囚禁离子和核磁共振(NMR)等体系具有很长的量子相干时间, 量子计算的基本原理最先是在这些体系中得到很好的验证, 然而要想将量子比特集成为相当大的规模, 不得不采用固态量子比特体系. 1999年, 日本科学家 Nakamura Y 等人首次利用超导电荷比特从实验上验证了单量子比特的全部操作<sup>[1]</sup>, 这是固态量子比特研究上的重大突破. 游建强等人在这一国际前沿上做出了如下有原创性的贡献:

(1) 要想组构出能完成任意运算的量子逻辑电路, 必须实现两位超导量子比特. 其核心问题就是如何在任意两个单超导电荷比特之间实现纠缠耦合. 他们首次在国际上提出利用互感实现超导电荷比特之间耦合的方案. 通过将单、双量子比特哈密顿量表示成自旋 1/2 表象中的简约形式, 从理论上严格证

明了单、双超导量子比特的操作、演化. 该项工作首次给出了超导双量子比特通过互感进行耦合的理论基础<sup>[2]</sup>.

(2) 为了实现量子比特的可集成性, 他们提出采用 1 个共用电感, 而不是 1 个 LC 电路, 在任意两个超导电荷比特之间实现可控的耦合<sup>[3]</sup>. 这一方案在现有的实验条件下是完全可行的, 故被称作可集成的量子计算的方案. 另外, 这项工作还证明了只需 1 个双位量子比特而非两个或更多个就可实现控制门操作. 工作发表后, 引发了国际同行从实验上来实现多比特超导电荷比特的的工作.

(3) 就如何在任何两个超导电荷比特之间引入可控耦合的问题, 他们又提出利用大 Josephson 结的 SQUID 器件来实现比特之间的纠缠和量子信息读

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: G2001CB309500)和国家杰出青年基金(批准号: 60125411, 60325416)资助项目  
2004-01-05 收到初稿, 2004-04-01 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: sslee@red.semi.ac.cn

出的方案,这一方案不仅具有量子比特间耦合精确可控的优点,而且,从实验上来讲也是完全可行的方案.它还能保证在不读时体系与外界处在退耦合状态.

## 2 几何量子计算

几何量子计算方案由于具备独特的容错能力而成为近几年量子计算研究中的新热点,在国际上受到极大的关注.这些方案超越传统动力学演化的操作模式,运用量子绝热演化产生的几何操作,即所谓的和乐变换(holonomic transformation),来实现量子逻辑门操纵.2001年,奥地利 Innsbruck 大学的段路明等提出在绝热演化条件下如何通过对囚禁离子进行几何操作来实现量子计算的方案<sup>[4]</sup>.但是,绝热演化只是一种理想情况,这一条件本身就意味着这种绝热几何量子计算的速度必须很慢才行.这必然限制了它的应用.因此,研究非绝热条件下的几何量子计算就显得十分重要.另一方面,研究几何操作的非绝热效应也是非自治系统量子力学研究中的重大前沿课题,特别是有关非阿贝和乐变换的非绝热效应研究在国际上尚无人涉及.岑理相、李新奇等人在这方面做出了创新性的成果.

(1)岑理相等人创新性地运用非自治系统量子力学研究的最新成果——代数动力学与规范变换方法,研究了几何量子计算典型系统的演化过程,首次获得了非绝热情形下的精确结果,其中既包含了阿贝和乐变换的非绝热效应,又包含了更为复杂的非阿贝和乐变换的非绝热效应.在忽略二阶光学过程的条件下,具体给出了在单量子比特和双量子比特中由非绝热效应引起的泄漏错误和相位修正<sup>[5]</sup>.

(2)提出了实现几何量子计算的一种新的非绝热方案,他们设法使态矢量在演化过程中始终垂直驱动外场(磁场),使得几何 AA 相位(Aharonov - Anandan 相位)是纯几何演化相位,不再受动力学演化相位的影响,不再需要像现有方案那样设计复杂的反向演化路径来消除动力学相位.他们方案另外的优点是不需要构造驱动哈密顿量的复杂的简并本征空间,只需采用具有二能级的囚禁离子,而不需要采用复杂的三、四能级的囚禁离子(后者在实际中很难寻找到)<sup>[6,7]</sup>.

## 3 量子点量子比特

利用半导体量子点来实现量子比特是固态量子

信息领域最热门的研究方向之一.自组织生长的量子点由于其近乎完美的晶体结构而受到人们的青睐.

(1)能否进一步提高量子态的消相干时间是利用量子点实现量子比特的关键问题之一.李树深等人提出利用外加电场来增加消相干时间的方案,研究并获得了将单量子点用于量子计算的外形参数相图,对设计固态量子计算器件有一定指导意义<sup>[8]</sup>.

(2)利用量子点实现量子计算的另一关键问题是量子比特系统的可扩展性,这也是国际上研究的热点之一.李新奇等提出了一个构造量子点量子比特的新方案.该方案利用带间电子空穴对储存量子信息,与常规量子点量子比特相比,量子比特的相干性大为改善.利用将耦合量子点置于光学微腔中,可实现量子比特间的信息交换.在深入分析了耗散动力学行为的基础上,李新奇等还证实利用该系统可以组构出普适逻辑门.这些方案建立在已有或即将发展的实验技术上,具有较强的可行性,对实现利用量子点的量子信息处理具有重要的指导意义<sup>[9]</sup>.

## 4 量子计算若干基本问题的研究

量子计算的基本物理过程可以通过对波函数进行制备、操作和测量来实现.要保证量子计算所涉及的物理过程能准确无误地进行,体系必须能在足够长的时间内保持良好的相干性.因此,必须研究量子系统中的相干特性和量子系统与周围环境相互作用引起的耗散等若干重要基础问题.

(1)江兆潭等人采用将两个量子点分别嵌入 Aharonov-Bohm 环两个臂中的办法,运用修正的速率方程方法,具体研究了量子点间耦合引起的每个量子点占据数的相干 Rabi 振荡演化,以及点间耦合强度、量子点与连线耦合强度等参量对相干演化的影响<sup>[10]</sup>.

(2)为了研究介观结构在远离热平衡情况下的瞬态电导行为,游建强等人运用 Keldysh 非热平衡 Green 函数方法,发展了既满足电流守恒又保证规范不变的含时 Landauer-Buttiker 的完整理论.在对双势垒共振隧穿结构进行脉冲和正弦调制情况下,首次揭示了位移电流对隧穿电流的延迟相位有十分重要影响<sup>[11]</sup>.

(3)利用微波场可以将耦合量子点中的两个基态共振耦合起来,形成单量子比特,江兆潭等人在发展了修正的速率方程理论的基础上,具体研究了作

为测量单元的量子点接触对量子比特相干演化的退相干影响<sup>[12]</sup>。

(4) 量子耗散理论在考虑主体系与外界相互作用时,首先要将外界用一个由谐振子组成的量子库 (quantum bath) 来近似,然后采用各种理论方法(包括 Langevin 方程法,投影算符法, Feynman 路径积分法, Liouville 空间 Green 函数法等),使耗散体系量子化。李新奇等人采用组构量子主方程 (quantum master equation, QME) 的代数形式,完成了耗散体系的非厄密分解,研究了在存在能量弛豫和相干弛豫情况下腔量子电动力学 (CQED) 体系的量子动力学行为,揭示了以前尚未研究过的耗散效应的作用。从理论上来说, QME 法在某种程度上可以涵盖以前的某些理论方式,这将对研究量子光学和固体物理的相关问题有重要意义<sup>[13]</sup>。

(5) 为了考虑环境库对介观体系输运的退相干效应,李新奇等人采用 Buttiker 模型研究了有多重消相干散射源存在情况下,电子通过多势垒介观体系的输运性质,大大深化了对体系中消相干过程的认识<sup>[14]</sup>。

(6) 连续变量的讨论构成了现代量子信息研究的重要组成部分<sup>[15]</sup>,而在连续变量系统中,一组 Gaussian 态具有非常重要的作用。我们可以同时利用束分裂器 (beam splitters)、相移器 (phase shifters) 和压缩器 (squeezers) 由相干态制备出全部的 Gaussian 态<sup>[16]</sup>。迄今为止, Gaussian 态的可分离性问题已经基本解决了,而另外一个问题则是所谓的 Gaussian 态定域可交换性问题。这个问题是由 Eisert 和 Plenio 提出的<sup>[17]</sup>。在同一篇文章中,他们同时还发现了一个充分必要的判据,可以用来判定两部分 (以下几部分简称为几部) 两模 Gaussian 态的可交换性问题。王亮等人给出了三部三模 Gaussian 态<sup>[18]</sup>和二部任意模 Gaussian 态<sup>[19]</sup>的可交换性判据。对于三部态,既存在不等式条件,又有存在等式条件,因此,可交换的条件远比二部态严格得多。对于二部任意模 Gaussian 态,他们以一种很抽象的方式给出了一个充分必要的判据,为了实验上的可操作性,以此为基础,又给出了一个必要条件。

固态量子计算被国内外公认是未来量子信息的发展方向,但要真正实现用固态载体对量子信息进行存储和处理还有漫长的路要走。许多基本的物理问题 (如固态信息载体中的消相干) 尚待解决。在可选择的多种固态量子计算方案中,以半导体为基本载体的方案最为诱人。它可以充分利用现有及未来的半导体技术,并可与经典微电子信息处理系统实现集成。利用半导体中电子自旋进行量子计算可能是固态量子计算方案中最有前途的方案。在对固态量子计算的研究发展过程中,有可能产生出许多对传统经典信息处理的新原理与新方法,无疑会对整个信息产业产生巨大推动作用。

以上简单回顾了我们的课题组研究人员近年来在固态量子计算方面所作的一些研究工作,所持观点也仅是“一家之言”。由于量子信息是目前科学研究中的热点之一,有越来越多的科学家不断加入到研究队伍中来,新的研究成果和方案也不断涌现出来。由于篇幅所限,本文未能介绍国内外其他研究单位的优秀研究成果。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Nakamura C Y *et al.* Nature ( London ), 1999, 398 : 786
- [ 2 ] You J Q *et al.* Phys. Rev. B, 2001, 63 : R180501
- [ 3 ] You J Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 89 : 197902
- [ 4 ] Duan L M *et al.* Science, 2001, 292 : 1695
- [ 5 ] Cen L X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90 : 147902
- [ 6 ] Cen L X *et al.* Phys. Rev. A, 2002, 65 : 052318
- [ 7 ] Li X Q *et al.* Phys. Rev. A, 2002, 66 : 042320
- [ 8 ] Li S S *et al.* Proc. Nat. Acad. Sci., U. S. A., 2001, 98 ( 21 ) : 11847
- [ 9 ] Li X Q *et al.* Phys. Rev. A, 2002, 65 : 205301
- [ 10 ] Jiang Z T *et al.* Phys. Rev. B, 2002, 66 : 205306
- [ 11 ] You J Q *et al.* Phys. Rev. B, 2000, 62 : 1978
- [ 12 ] Jiang Z T *et al.* Phys. Rev. B, 2002, 65 : 153308
- [ 13 ] Li X Q *et al.* Phys. Rev. A, 2002, 65 : 023807
- [ 14 ] Li X Q *et al.* Phys. Rev. A, 2002, 65 : 155326
- [ 15 ] Braunstein S L *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80 : 869
- [ 16 ] Duan L M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84 : 2722
- [ 17 ] Eisert J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 89 : 097901
- [ 18 ] Wang L *et al.* Phys. Rev. A, 2003, 67 : 062317
- [ 19 ] Wang L *et al.* Phys. Rev., A, 2003, 68 : 020301( R )