

·学科进展与展望·

固态量子信息研究若干新进展

李树深 李新奇 岑理相 王亮 艾合买提

金光生 白彦魁 郑厚植*

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

[摘要] 在国家自然科学基金和国家重点基础研究专项经费(“973”项目)资助下,自2003年以来,中国科学院半导体研究所固态量子信息课题组在固态量子信息研究中取得了一些新进展。本文对这些进展作一些简单介绍。

[关键词] 固态量子信息, 量子比特, 量子测量

近年来,低维半导体结构的物理研究正处在由“能带工程”向“波函数工程”转变的关键时期。这不仅反映了科学研究本身发展的必然规律,同时又是人类文明需求牵引的结果。半导体电子学是当代信息技术的主要基础,它是依靠凝聚态物理的研究而发展起来的。但是以硅微电子技术为核心的半导体电子学,经过几十年的迅速发展后,现在又面临着新的挑战:再过10年左右时间可能要达到它发展的基本物理极限。能否实现微电子技术下一步的突破被看作为21世纪初期人们将要面对的最重大的科学问题之一。人们正全力以赴试图从物理原则上突破目前半导体器件的工作原理而得到全新器件,从而为信息科学的发展找到新的突破口。

波函数本身作为信息载体,正在由设想走向具体物理研究阶段。如果像“能带工程”那样,根据人们的具体要求,能够实现对波函数进行“剪裁”,那么信息科学就可以真正实现由经典向量子的跨越。在低维固态量子结构中可以制作出各种形态的波函数,但在利用波函数进行量子信息的存储、交换过程中会受到各种消相干因素的干扰和破坏,从而丢失部分或全部信息。未来量子信息的发展迫切需要对低维固体量子结构中的量子信息过程进行全面而深入的研究。

2003年以来,在国家自然科学基金和国家重点基础研究专项经费(973项目)资助下,中国科学院

半导体研究所量子信息课题组在几何量子计算、超导电荷量子比特、量子纠缠及其应用等方面的研究中,取得了一些有趣的进展,主要成果已经发表在PRL、PRA、PRB等国际著名学术期刊上。下面作一简单介绍。

1 几何量子计算方案

几何量子计算是一种利用量子体系整体的(拓扑性)位相来实现量子控制与操作的方案,它具有对局域错误不敏感的优点,成为近年来量子计算研究中的热点,在国际上受到极大的关注。该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囚禁离子进行几何操作来实现量子计算的方案^[4]。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。我们运用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

* 中国科学院院士。

本文于2004年6月8日收到。

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^[1]。

2 Gaussian 态定域交换判据

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,而连续变量系统中,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。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。这个问题由 Eisert 和 Plenio 提出。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。我们给出了三部三模 Gaussian 态^[3]和二部任意模 Gaussian 态^[4]的可交换性判据。对于三部态,既存在不等式条件,又存在等式条件,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,我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。

3 量子测量研究

由于量子计算结果的最后读出和中间纠错都要依赖量子测量,使它成为量子计算中的一个重要课题。我们研究了用量子点接触对量子比特进行测量时引入的退相干效应;量子点内和量子点间库仑作用对退相干的影响;在两位 Josephson 比特中与热库的 $\sigma_x \sigma_x$ 耦合所引起的退相干效应;利用统一的量子主方程方法,研究耦合量子点中因量子测量引起的退相干效应。该工作引起了英国剑桥大学 Stace 小组兴趣,开展了密切的交流^[2]。

4 超导量子比特的退相干

超导量子计算被人们认为是很有前途的一种方案。这是因为组成超导量子计算机的基本单元 Josephson 隧穿结不仅可以用现有实验技术制成而且在低温下可以避免隧穿结多余的自由度使得它在动力学机制中的耗散很小,利用 Josephson 结的非线性性质可以构造出一个像自旋-1/2 粒子那样的 Hamil-

ton 量。我们研究了由一个电感耦合的两个 Josephson 电荷量子比特系统的退相干问题。根据所针对的量子计算方案特殊的结构我们考虑了由外加磁通量引起的耗散效应^[5]。

5 三能级原子最大纠缠态的产生

三能级量子系统 (qutrit) 是对已广泛研究的二能级系统 (qubit) 的自然扩展。人们发现对于许多量子信息处理的任务,应用 qutrit 来完成将更为优越。例如,相比于 qubit,使用 qutrit 会使一些类型 Bell 不等式的验证更为容易,基于 qutrit 的量子密码通讯协议会更为安全、有效。

基于 Rauschenbeutel 等人的实验装置 [Science 288, 2024(2000)], 我们提出了一个产生多个三能级原子最大纠缠态的实验方案^[6]: 让多个高激发的三能级 Rydberg 原子顺序通过多个微波超导腔。微腔最初被制备在特定的数态叠加态,这些原子与腔中的光子发生共振相互作用。通过控制原子与光子间的有效相互作用及对腔场态的后选择测量,可以将这些原子的量子态以很大的成功几率投影到所需的最大纠缠态。我们考虑了一些现实因素对此实验方案的影响,考虑到不可避免的腔场、原子的耗散和不完美的量子 Rabi 脉冲,计算了所制备量子态的可信度。我们还进一步讨论了如何分析、辨别所得到的原子最大纠缠态。

我们提出的方案不要求对每个原子进行分别的寻址,同时在原理上可直接推广到原子数为 $N(N \geq 2)$ 的情况。基于现今微波腔量子电动力学实验技术的飞速发展,这一方案是完全可行的。

6 LOCC 方法探测量子纠缠

在量子信息处理的过程中,制备纠缠态是一个基本的要求。因此一个有效的识别纠缠态的实验方法有着重要的意义。在低维情况 ($2 \times 2, 2 \times 3$) 下,最常用的识别纠缠态的理论判据是 Horodecki 父子提出的 PPT 判据(对于一个量子态 ρ , 当且仅当它的部分转置是一个正算子时为非纠缠态)。在实际操作中,由于部分转置是一个非物理操作,所以只能假设操作前已知量子态的信息。最近对于未知量子态,波兰学者 Powel Horodecki 利用部分转置的结构物理近似,通过一个量子网络实现了纠缠态的探测。我们基于量子通讯的考虑,研究了通讯双方 (Alice 和 Bob) 用局域操作和经典通讯 (LOCC) 的方法进行未知量子态的纠缠探测^[7]。在我们的方案中, Alice 和

Bob 各自使用一个量子网络, 并且利用了转置操作的结构物理近似。这种方法有以下三个优点: (1) 转置操作的结构物理近似已经实现; (2) 在每一轮测量中需要更少的拷贝, 提高了测量的效率; (3) 对基于纠缠态的量子密钥分配有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Cen Lixiang, Li Xinqi, Yan Yijing. Evaluation of Holonomic Quantum Computation: Adiabatic Versus Nonadiabatic. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90, 147 902: 1—4.
- [2] Wang Liang, Li Shushen, Zheng Houzhi. Conditions for the local manipulations of tripartite Gaussian states. *Phys. Rev. A*, 2003, 67, 062 317: 1—4.
- [3] Wang Liang, Li Shushen, Yang Fuhua et al. Conditions for the local manipulation of all bipartite Gaussian states. *Phys. Rev. A*, 2003, 68 (R), 020 302: 1—4.
- [4] Li Xinqi, Zhang WenKai, Cui Ping et al. Quantum measurement of a solid-state qubit: A unified quantum master equation approach. *Phys. Rev. B*, 2004, 69, 085 315: 1—9.
- [5] Ahmad Abliz, Li Shushen, Sun Lianliang et al. Decoherence of two solid state qubits coupled via $\sigma_x\sigma_x$ coupling exposed to σ_x noise. *Phys. Rev. A*, 2004, 69, 052 309: 1—5.
- [6] Jin Guangsheng, Li Shushen, Feng Songlin et al. Method for generating maximally entangled states of multiple three-level atoms in cavity QED. *Phys. Rev. A*, 2004, 69, 034 302: 1—4.
- [7] Bai Yankui, Li Shushen, Zheng Houzhi. Detecting Quantum Entanglement by Means of Local Operations and Classical Communication. *Phys. Rev. A*, 2004, 69, 052 305: 1—4.

SOME LATEST PROGRESSES RESEARCHING ON SOLID-STATE QUANTUM INFORMATION

Li Shushen Li Xinqi Cen Lixiang Wang Liang Abliz Ahmad
Jin Guangsheng Bai Yankui Zheng Houzhi

(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083)

Abstract Under the supporting of the National Natural Science Foundation and the special funds for Major State Basic Research Project of China, some progresses have been achieved in the research group of solid-state quantum information in the State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. In this paper, we review some latest progress on these progresses.

Key words Solid state quantum information, Qubit, Quantum measurement

·资料·信息·

“科学道德和学风建设论坛”在四川举行

2004年5月13—15日,应中国科协邀请,国家自然科学基金委员会监督委员会常务副主任王乃彦院士出席了在中国科协在四川绵阳举办的“科学道德和学风建设论坛”并应邀作了题为“弘扬求真务实精神,加强科学道德建设”的特邀报告。王乃彦院士全面介绍了国家自然科学基金委员会监督委员会的工作情况,阐明了国家自然科学基金委员会致力于弘扬科学道德、坚持求真务实、反对不端行为的宗旨,着重分析了当前我国科技界存在的科学不端行为以及在国家科技资源使用中反映出来的科学道德和学风问题。

报告内容丰富、观点深刻,受到与会专家的好评。

在本次研讨会上,自然科学基金会科学基金监督工作受到中国科协领导和与会代表的高度关注,国家自然科学基金委员会监督委员会开展对科学不端行为的调查工作得到大家一致肯定。有关领导和专家还对科学基金管理诸方面的工作提出了若干意见和建议。与会者普遍认为,国家自然科学基金委员会设立监督委员会,对弘扬科学道德,鞭笞不端行为,具有重大意义。

(纪检监察审计局 吴善超 供稿)