

文章编号: 1007-5461(2004)06-719-06

腔量子电动力学与量子信息过程

耿涛, 李刚, 王军民, 张天才

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘 要: 本文简要介绍了实现量子信息的几种可能方案, 特别是腔 QED 方案的背景、特点、主要困难和目前的进展, 同时介绍了山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室在这方面的实验进展。

关键词: 量子信息; 腔量子电动力学; 单原子; 单光子

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

1 量子信息概况

量子信息科学 (Quantum information science) 是信息科学与量子物理这两个重要科学研究领域的结合, 是集量子物理、计算机、数学、工程技术、微电子技术等为一体的交叉边缘学科, 是随着 Bennioff, Feynmann, Deutsch, Bennett, Shor 等先驱者的一系列开创性的工作逐步发展起来的。在过去十几年里, 量子信息的研究有了突飞猛进的发展。纠缠 (Entanglement) 特性是构成现代量子信息最重要的基础, 也是量子物理与经典物理最重要的区别之一。

量子信息主要包括量子通信、量子计算、量子计算机的物理实现等若干方面。由于量子信息的非克隆性和不可完全测量特性, 量子通信中以纠缠为基础的量子密钥能够实现绝对保密的密钥交换^[1], 通过量子密集编码可以更为有效地传递信息^[2], 量子远程传送的实现可以将量子信息在各量子系统间传递^[3]。现代计算机信息的存储、读写和复制等操作都是用经典物理过程来实现的, 而量子计算机则是以量子逻辑运算为基础。1994年, Shor^[4]等证明运用量子计算可以大幅度提高大数质因子分解的速度, 其耗时将随着数位的增加呈多项式增加而不是经典计算机下的指数增长。后来 Grover^[5,6]发现了所谓 Grover 迭代算法, 可以实现对未加整理数据库 \sqrt{N} 量级加速搜索, 这很有可能解决经典上所谓 NP 问题。1989年, Deutsch 将经典 Toffoli 门^[7]推广到量子情况, 得到了 Deutsch 门^[8], Divincenzo 进一步证明了 Deutsch 门可以用两位门组实现^[9], 且差不多任意 2-位门和 n-位门对量子计算都是通用门组^[10]。这些研究为实现量子计算机提供了可行的途径。

然而客观上实现量子信息处理过程仍然面对许多困难。量子信息成功实现需满足以下条件: 对量子现象的控制 (即对原子、离子、光子等在量子水平上的掌控); 系统的量子噪声非常低 (这样才能获得比较长的相干时间); 快速的相干转换时间以保证量子逻辑运算能够在特定时间内完成。量子位和它所处的“环境”的纠缠, 不可避免地造成量子信息处理过程中的消相干, 使编码信息散失到无法控制的环境中, 从而破坏量子计算。局部杂散场, 粒子之间的碰撞以及自发辐射等都会引起消相干。真空量子起伏造成的影响通常成为量子测量和量子信息的最终也是最大的障碍。

目前已经提出了多种可应用于量子信息处理的物理系统, 包括离子阱 (Ion trap)^[11,12], 量子点 (Quantum dot)^[13,14], 核磁共振 (NMR)^[15], 腔量子电动力学方案 (腔 QED)^[16,17], 纠缠光子以及超导过程等等。他们都有自己的特点, 利用这些方案各自的优点, 选择他们之间的结合可能是未来成功的方向。

1995年 Cirac 和 Zoller^[11]提出了利用离子阱实现量子信息的方案, Steane^[12]详细地描述了该方案: 在加在电极上射频电场和静电场的复合电场作用下, 一串离子被限制在高真空的线性势阱中, 沿阱轴方向排列。阱中的超冷离子处于一个几乎与外界隔绝的环境中, 极大程度地减小了由环境引起的消相干效应。每个离子都可以提供一个物理量子位, 使用一对激光束照射单个离子, 控制激光频率和脉冲持续时间, 驱

基金项目: 国家自然科学基金 (10434080, 10374062, 60178006), 山西省留学和青年基金 (20031002) 的资助。

收稿日期: 2004-10-12

E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

动离子内部态的跃迁即可实现对单个量子位的转换。离子阱的好处是离子之间的相互库仑作用使离子之间相距较远,便于将单个激光脉冲调谐到某一离子的基态和激发态以实现量子读取和变换。同时离子的控制相对中性原子更方便。但该方案是靠所有离子产生共同的质心运动所形成的声子来完成量子信息的传递的,其开关速度不快。与此同时,用数目极大的激光束脉冲操作各个离子执行逻辑运算时,时间-能量测不准关系决定了激光脉冲能量的不确定度应比质心振动的特征频率小,每个光脉冲的持续时间应长于该特征频率的倒数;而声子的振动频率一般较低,实验中特征频率约为 100 千赫兹,运算速度难以提高。此外也不易实现大量离子在阱中的冷却。目前已经可以将五个离子制备在同一个平面射频离子阱中,离子间距约为 $10\mu\text{m}$ [18]。

核磁共振 (Nuclear magnetic resonance, NMR) 是发展较快的一种量子信息处理方法。在 NMR 中,量子比特是赋予特定分子的一定核自旋态上。在恒定外磁场中,每一个核自旋要么向上要么向下。自旋态在退化和消相干之前可以保留较长时间,量子比特因此可以得到存储。同样可以通过一个脉冲磁场作用于自旋态上实现自旋的 Rabi 振荡,选定合适的磁脉冲可以实现对单个磁自旋态的变换,因为只有那些处于与外加磁场共振的自旋态才会产生作用。同时自旋态中也存在磁偶极相互作用,这种作用可以用于实现逻辑门。Braunstein [19] 等人的计算表明,现有 NMR 系统不可能产生纠缠态,但也有人提出质疑。无论如何,用它作为量子信息的硬件许多学者认为会遇到困难:相干信号与背景噪声之比会随着每个分子中核自旋数目的增加而指数衰减,在一个实际系统中,用 NMR 实现 10 个量子比特的量子计算就会遇到严峻挑战。当然也有学者对上述论点持有不同看法,对 NMR 实现量子逻辑门持乐观态度。

量子点也是一种被寄予厚望的实现量子信息的途径。它的量子位为嵌在固体材料中的固态量子器件。通过粒子间的磁偶极相互作用或是电偶极相互作用,可以实现量子逻辑门操作。与目前的半导体技术结合,该方案在集成化和实际应用方面有很大前景。此外还有一些其他可能实现量子计算的物理系统,如光学晶格 (optical lattice) 中的原子,纠缠光子以及超导 (superconductor) 等凝聚体材料。尽管消相干机制不同,但是它们都可以制备相应的量子位和测量各自的量子态,为量子计算的实现提供了可能的方案。

2 腔量子电动力学

腔量子电动力学 (Cavity quantum electrodynamics) 是实现量子信息的重要方法之一,也是目前在实验上获得决定性多粒子纠缠 (Deterministic multi-particle entanglement) 的物理系统。

腔 QED 的基本思想是利用高精度光学腔或者微波共振器,在单原子-单光子水平上获得相干动力学过程 [20]。要达到这一点,必须建立模体积非常小的,极低损耗的腔以增强单光子的电场,提高原子-光场作用的相干 Rabi 频率,使之大于原子的自发辐射率或者光场在腔内的衰减速率,即所谓强耦合作用。目前包括光频区和微波区,全世界有 10 个左右的实验室达到这一点。

利用腔 QED 系统可以实现原子 (离子等) 的量子比特和光子量子比特 (量子态) 之间的转变,从而完成量子信息过程。人们利用原子-光子、原子-原子以及光子-光子之间的纠缠,提出了许许多多实现双量子比特的方案 [21,22]。其中有些思想被实验证明原则上是可行的 [17,23],在此基础上也有人提出利用逻辑门建立有规模量子网络的设想。腔 QED 系统在实现分布式量子信息过程和量子通讯方面具有独特的优势 [24,25],也是获得稳固、可操控的确定性单光子和多光子源的最有效的途径之一 [26~28]。此外,腔 QED 系统是实现单原子探测的一种富有吸引力的方法 [29,30]。

目前腔 QED 系统主要集中在以下几个方面: 1) 微波腔中的 Rydberg 原子系统。以法国高师的 Haroche 研究组为代表 [31]。在此系统上已经实现了原子和微波场之间的强耦合。这方面的一个困难是飞行原子进入腔场的随机性问题,需要对单个原子进行更加有效的控制。2) 光学腔中的中性原子系统。以美国加州理工学院的 Kimble 小组 [28] 和德国量子光学研究所的 Rempe 小组为代表 [32]。该系统上不仅实现了腔场和原子之间的强耦合,而且在光学阱中对原子的控制有了实质性的提高,但要获得原子的长时间精确控制同时保持原子与光场之间的强耦合仍然面临很多问题。3) 光学腔中的离子俘获。最近在该系统上实现了线性势阱 [33,34],但是要在该系统上实现离子和腔场的强耦合就必须在不影响俘获离子光场的同时减小腔的尺寸,这点实验上还没有解决。还有一些其它的腔 QED 系统: 半导体中的量子点、腔中的超导节点和

基于腔 QED 的中性原子团等。

腔 QED 是实现原子 - 光子纠缠的理想系统^[35], 利用腔场作为媒介还可实现不同原子之间的纠缠^[36]。同样的方法可以产生原子 - 光子 - 原子的三组分纠缠^[37] 和两个不同腔模之间的纠缠^[38]。1995 年 Kimble 小组首先利用高精度光学腔中的铯原子和腔场之间的强耦合作用成功实现了量子逻辑门^[17]。近年来利用光学偶极俘获等方法可以将原子在腔中俘获时间延长到几秒^[39,40], 使得长时间观察和研究腔 QED 的原子与光场相互作用过程成为可能, 如腔内原子在腔场中的运动情况的测量^[41,42], 单原子激光^[43] 等。这些进展可望为未来量子信息处理过程解决若干问题^[27]。量子网络可以连接远程量子处理器和量子存储单元, 相对于局域量子计算在处理量子信息方面更有优势。但是这种量子网络的关键是要求系统可以在静止量子比特和飞行量子比特之间相互转换, 并且可以在几个特定的地域之间传输量子比特, 而强耦合的腔 QED 系统提供了实现量子网络的可能。Rempe 小组和 Kimble 小组分别利用 Rb 原子和 Cs 原子与高精度微腔腔场的强耦合成功实现了可应用于量子网络的确定性单光子源^[28,44]。然而许多处理量子信息的方案需要几个原子同时存在于同一个高精度微腔中, 不同原子内态的联系是通过它们和腔场的强耦合作用实现的, 对腔内多原子的控制将成为关键。最近 Kimble 小组的 McKeever 通过微腔透射功率对腔内原子数变化的动力学特性进行了分析, 为实现多原子和腔场之间的强耦合实验做了一定的准备^[45]。

总之, 强耦合腔 QED 系统为量子计算和量子网络提供了一个实验的平台, 人们已初步实现了原子量子位和光子量子位的转换以及确定性单光子源和纠缠光子源的制备, 并且正致力于研究微腔中的原子俘获系统和高效单光子源的产生。在未来的 10-15 年里, 人们有望实现腔内的单量子位操控、腔 QED 系统的量子位阵列存储、腔内两个和多个原子的控制、确定性的纠缠光子源、双原子逻辑门、两原子与腔系统的相干量子传输等, 并进而推进量子网络的实现^[46]。

3 腔 QED 进展

山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室正在开展光频区腔 QED 的研究^[20]。我们围绕强耦合腔 QED 的条件, 在原子冷却、低损耗微腔以及单量子测量几方面取得了一定进展。分别简述如下:

1) 在原子冷却与操控方面, 获得了磁光阱并实现了光学偶极俘获。我们使用铯原子双磁光阱结构(图 1(a)), 上下两级真空室之间由一根直径为 4 mm, 长为 100 mm 的无氧铜管连接, 用作冷原子向下传输的通道。下级真空室中放置一高精度光学微腔^[20]。下级真空室的真空度较上级真空室高约一个数量级(上级真空室的典型真空度约为 5×10^{-7} Pa), 有效地降低了下级真空室中背景原子的碰撞几率。利用第二级磁光阱将下落原子再次俘获, 然后关闭第二级磁光阱使铯原子自由下落。在位于第二级磁光阱中心正下方约 5 mm 的微腔中用光学偶极俘获的方法在腔内俘获原子^[47]。我们已经在上级真空室中成功俘获约 1×10^8 个铯原子(图 1(b)), 经过短程飞行时间法测量它的温度约为 $70 \mu\text{K}$ ^[48]。在此基础上, 我们在第一级磁光阱中将单束高斯光场聚焦, 成功实现了铯原子的光学偶极俘获。图 1(c) 是光学偶极阱中冷原子云在探测光照射下发出的荧光图像。实验上利用扫描探针光场测得偶极阱中原子的光频移(Light shift)约为 24 MHz, 相应的光学偶极阱半径约为 $50 \mu\text{m}$, 对应的阱深约为 1.9 mK。

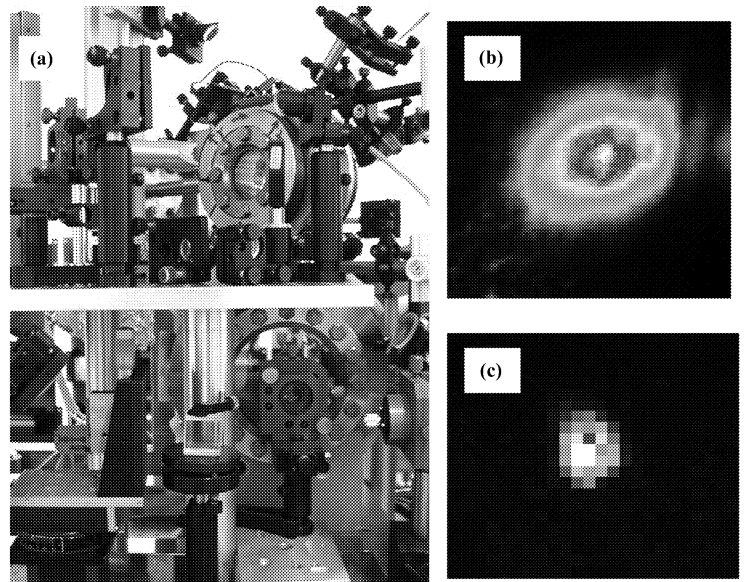


Fig.1 (a) Double MOT system (b) fluorescence of cold atoms in upper MOT (c) in optical dipole trap.

2) 利用“超镜”(Super-mirror)建立了一套高精度的光学微腔(图 2(a))。通过在一定中心波长处测量其自由光谱区,确定了该微腔腔长为 $48.7 \mu\text{m}$, 相应的模体积为 $1.617 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 。通过扫描微腔腔长,我们得到腔的透射谱(图 2(b)和图 2(c)),由此得到微腔精细度约为 2.1×10^5 。我们利用同样镜片建立了一套长度在 17.8 mm 的腔并通过腔衰荡(Cavity ring-down)方法获得该“超镜”在 852 nm 处的总损耗约为 15 ppm , 对应的精细度约为 2.13×10^5 [49]。由此得到微腔腔场和铯原子之间的耦合系数约为 37 MHz , 大于腔场的衰减率 7.6 MHz 和铯原子的自发辐射率 5.2 MHz 。相应的腔内的临界光子数和临界原子数分别为 0.007 和 0.03 。说明该系统可以进入强光与原子作用强耦合范围。

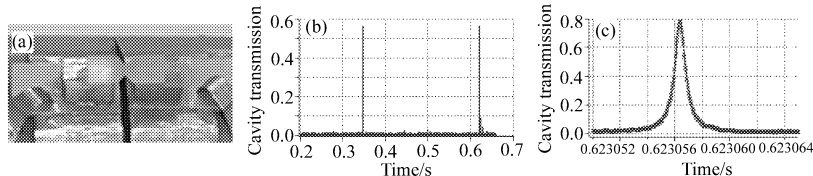


Fig.2 (a)Microcavity (b)cavity transmission (c)close-up of the transmission peak.

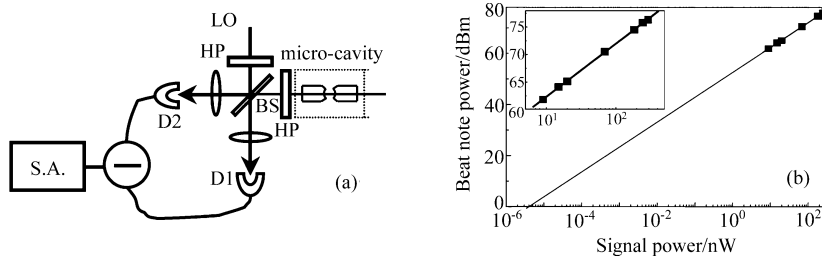


Fig.3 Heterodyne detection system

(a)setup of homodyne detection (b)beat note power versus signal power.

单光子在腔内的相互作用。与此同时我们还建立了利用单光子探测器分析光子统计性质的一套系统,基于 HBT 实验可以完成对不同非经典统计性质的光场的测量,包括单光子态的测量和甄别。为分析微腔透射光场的量子统计性质做好了准备。

4 结 论

本文简要介绍了实现量子信息的一些可能方案,特别就腔 QED 作为实现量子信息的一种途径进行了分析。文中介绍了腔 QED 系统实现量子信息的一些特点并介绍了国际上这方面的研究动态和发展前景。同时我们还介绍了山西大学从事这方面研究的一些进展。作为一个能够在实验室环境下观察微观客体量子行为的系统,腔 QED 为我们获得原子-光子、光子-光子以及原子-原子之间的纠缠提供了一个很好的途径,也为单光子源和多光子源的制备提供了可能。假如腔 QED 不是实现实用化量子信息的最终方案,它无疑会成为我们探索光与原子作用的基本过程、认识量子物理一系列丰富多彩现象的重要手段。

参考文献:

- [1] Ekert A K. Quantum cryptography based on Bell's theorem [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67(6): 661-663.
- [2] Li X Y, Pan Q, Jing J T, et al. Quantum dense coding exploiting a bright Einstein-Podolsky-Rosen beam [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88(4): 047904.
- [3] Zhang T C, et al. Quantum teleportation of light beams [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, 67(3): 033802.
- [4] Shor P W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring [C] // in *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, IEEE Computer Society Press, 1994, 124-134.
- [5] Grover L K. A fast quantum mechanical algorithm for database search [C] // in *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computation*, ACM Press, 1996, 212-219.
- [6] Grover L K. Quantum mechanics helps in searching for a Needle in a Haystack [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79(2): 325-328.

3) 确定原子与腔场作用的过程需要高灵敏的探测系统。为此我们建立了一套光学差拍探测弱光系统。其基本结构如图 3(a) 所示。通过自制射频探测器获得了灵敏的差拍信号。我们测试了不同入射功率下的射频信号功率(如图 3(b)),从而确定了该系统的灵敏度,得到对连续光的最小可探测功率为 3.6 fW 。这一结果对应的腔内平均光子数为 0.0014 (用前面介绍的微腔)[50]。表明该探测系统有足够的灵敏度观察单原子与

- [7] Fredkin E, Toffoli T. Conservative logic [J]. *Int. J. Theoretical Physics.*, 1982, 21: 219-253.
- [8] Deutsch D. Quantum computational networks [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1989, 45: 73-90.
- [9] Divincenzo D P. Two-bit gate are universal for quantum computation [J]. *Phys. Rev. A.*, 1995, 51(2):1015-1022.
- [10] Deutsch D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1985, A400: 97-117.
- [11] Cirac J I, Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74(20): 4091-4094.
- [12] Sleane A. The ion trap quantum information processor [J]. *Appl. Phys. B.*, 1997, 64: 623-642.
- [13] Barenco A, Deutsch D, Ekert A. Conditional quantum dynamics and logic gates [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74(20): 4083-4086.
- [14] Loss D, Divincenzo D P. Quantum computation with quantum dots [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, 57(1): 120-126.
- [15] Gershenfeld N A, Chuang I L. Bulk spin-resonance quantum computation [J]. *Science.* 1997, 275: 350-356.
- [16] Sleator T, Weinfurter H. Realizable universal quantum logic gates [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74(20): 4087-4090.
- [17] Turchette Q A, Hood C J, Lange W, *et al.* Measurement of condition phase shifts for quantum logic [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75(25): 4710-4713.
- [18] Report of the NSF workshop [R]. *U.S.A.*, Quantum Information Science, 1999, 1-36.
- [19] Braunstein S L, Caves C M, Jozsa R, *et al.* Separability of very noisy mixed states and implications for NMR quantum computing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(5): 1054-1057.
- [20] Zhang T C, Wang J M, Peng K C. Experimental progress of cavity quantum electrodynamics in the optical domain [J]. *Physics (物理)*, 2003, 32(11): 751-756 (in Chinese).
- [21] Pellizzari T, Gardiner S A, *et al.* Decoherence, continuous observation, and quantum computing: a cavity QED model [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75(21): 3788-3791.
- [22] Yi X X, Su X H, You L. Conditional quantum phase gate between two 3-state atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(9): 097902.
- [23] Rauschenbeutel A, Nogues G, Osnaghi S, *et al.* Coherent operation of a tunable quantum phase gate in cavity QED [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(24): 5166-5169.
- [24] Cirac J I, Zoller P, *et al.* Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes in a quantum network [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 78(16): 3221-3224.
- [25] van Enk S J, *et al.* Quantum communication with dark photons [J]. *Phys. Rev. A.*, 1999, 59: 2659-2664.
- [26] Lange W, Kimble H J. Dynamic generation of maximally entangled photon multiplets by adiabatic passage [J]. *Phys. Rev. A.*, 2000, 61(6): 063817.
- [27] Kuhn A, Hennrich M, Rempe G. Deterministic single-photon source for distributed quantum networking [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89(6): 067901.
- [28] McKeever J, Baca A, Boozer A D, *et al.* Deterministic generation of single photons from one atom trapped in a cavity [J]. *Science*, 2004, 303: 1992-1994.
- [29] Hood C J, *et al.* Real-Time cavity QED with single atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80(19): 4157-4160.
- [30] Shimizu Y, Shiokawa N, Yamamoto N, *et al.* Control of light pulse propagation with only a few cold atoms in a high-finesse microcavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89(23): 233001.
- [31] Bertet P, Osnaghi S, Rauschenbeutel A, *et al.* A complementarity experiment with an interferometer at the quantum-classical boundary [J]. *Nature.* 2001, 411: 166-170.
- [32] Maunz P, *et al.* Cavity cooling of a single atom [J]. *Nature.* 2004, 428: 50-52.
- [33] Guthohrlein G R, *et al.* A single ion as a nanoscopic probe of an optical field [J]. *Nature.* 2001, 414: 49-51.
- [34] Mundt A B, Kreuter A, *et al.* Coupling a single atomic quantum bit to a high finesse optical cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89(10): 103001.

- [35] Brune M, Hagley E, Dreyer J, *et al.* Observing the progressive decoherence of the “ Meter ” in a quantum measurement [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77(24): 4887-4890.
- [36] Hagley E, *et al.* Generation of Einstein-Podolsky-Rosen pairs of atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79(1): 1-5.
- [37] Rauschenbeutel A, Nogues G, Osnaghi G, *et al.* Step-by-step engineered multiparticle entanglement [J]. *Science*, 2000, 288: 2024-2028.
- [38] Rauschenbeutel A, Bertet P, Osnaghi S, *et al.* Controlled entanglement of two field modes in a cavity quantum electrodynamics experiment [J]. *Phys. Rev. A.*, 2001, 64(5): 050301.
- [39] Ye J, *et al.* Trapping of single atoms in cavity QED [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(24): 4987-4990.
- [40] McKeever J, Buck J R, Boozer A D, *et al.* State-insensitive cooling and trapping of single atoms in an optical cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(13): 133602.
- [41] Pinkse P W H, *et al.* Trapping an atom with single photons [J]. *Nature*, 2000, 404: 365-368.
- [42] Hood C J, *et al.* The atom-cavity microscope: single atoms bound in orbit by single photons [J]. *Science*, 2000, 287:1447-1453.
- [43] McKeever J, Baca A, Boozer A D, *et al.* Experimental realization of a one-atom laser in the regime of strong coupling [J]. *Nature*, 2003, 425: 268-270.
- [44] Carmichael H, Orozco L A. Single atom lasers orderly light [J]. *Nature*, 2003, 425: 246-247.
- [45] McKeever J, Buck J R, *et al.* Determination of the number of atoms trapped in an optical cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93(14): 143601.
- [46] Chapman. A quantum information science and technology roadmap [R]. Report of the quantum information science and technology experts panel 2004. Advanced Research and Development Activity.
- [47] Liu Tao, Zhang Tiancai, Wang Junmin, *et al.* Optical dipole trap in a high-finesse micro-cavity[J]. *Acta. Phys. Sin.* (物理学报), 2004, 53(5): 1346-1350 (in Chinese).
- [48] Geng Tao, *et al.* Temperature measurement of cold atoms in a cesium magneto-optical trap by means of short-distance time-of-flight absorption spectrum [J]. (submitted to *Acta. Phys. Sin.* (物理学报)) (in Chinese).
- [49] Li Liping, Liu Tao, Li Gang, *et al.* Measurement of ultra-low losses in optical supercavity [J]. *Acta. Phys. Sin.* (物理学报), 2004, 53(5): 1401-1405 (in Chinese).
- [50] Li Gang, Li Liping, Du Zhijing, *et al.* Ultra-low mean-photon-number measurement with balanced optical heterodyne detection [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, 21(4): 671-674.

Cavity QED and quantum information process

GENG Tao, LI Gang, WANG Jun-min, ZHANG Tian-cai

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We briefly introduce the protocols of realizing quantum information process, mainly focus on the cavity quantum electrodynamics (cavity QED), including its background, features, difficulty and the progress. We also introduce the recent progress of cavity QED in State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices at Shanxi University.

Key words: quantum information; cavity QED; single atoms; single photons

作者简介: 耿涛 (1978, 7 -), 山西省太原市人, 毕业于山西大学电子系电子学与信息系统专业, 现为山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室博士研究生。

张天才 (1966, 4 -), 重庆江津人, 理学博士, 教授, 博士生导师。现在山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室从事量子光学、量子信息以及冷原子物理方面的实验研究与理论研究。先后在法国国家科学中心(CNRS)、美国加州理工学院(Caltech)等从事相关研究。