

中性原子量子信息处理新进展: 超快高保真态读取

黄冬郁^{1,2,3}, 王健^{1,2*}, 李传锋^{1,2,3*}, 郭光灿^{1,2,3}

1. 中国科学技术大学量子信息实验室, 合肥 230026

2. 中国科学技术大学安徽省量子网络重点实验室, 合肥 230026

3. 合肥国家实验室, 合肥 230088

* 联系人, E-mail: jwang28@ustc.edu.cn; cfl@ustc.edu.cn

New advances in neutral atom quantum information processing: ultrafast high fidelity state readout

Dongyu Huang^{1,2,3}, Jian Wang^{1,2*}, Chuanfeng Li^{1,2,3*} & Guangcan Guo^{1,2,3}

¹ Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

² Anhui Province Key Laboratory of Quantum Network, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

³ Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China

* Corresponding authors, E-mail: jwang28@ustc.edu.cn; cfl@ustc.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-5362](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5362)

凭借对微观量子系统的精确操控能力, 人类正在发展量子计算、量子通信和量子精密测量等新型技术, 这些技术在一些特定任务中展现出了超越经典系统的优越性能. 为进一步拓展量子技术的应用边界, 研究者提出了构建量子网络的设想^[1,2]. 这种网络通过连接不同量子系统, 利用其非经典关联特性, 有望实现更安全的通信协议、分布式量子计算和更高精度的传感测量. 实现这一愿景需要突破若干关键技术挑战, 包括开发高效的量子系统-信道接口, 以及提升量子态的制备、操控和检测能力. 其中, 长距离纠缠的建立作为核心环节, 依赖于纠缠交换和量子纠错等技术, 这些方法通过引入额外纠缠资源、增加量子门操作和量子态测量等手段, 显著提高了远距离纠缠态的生成速率和保真度. 在此过程中, 快速且高保真度的量子态读取技术尤为关键, 它直接影响通信速率, 并能有效降低量子门操作和物理资源的消耗.

在各种量子系统中, 中性原子体系因其突出的可扩展性^[3]、高保真度量子门操作^[4]以及高效的原子-光子接口^[5], 被视为构建量子网络的理想平台. 现代激光技术可通过光晶格或光镊阵列捕获数千个激光冷却的中性原子, 并利用微波或激光脉冲精确操控其量子态. 这些原子丰富的光学跃迁为实现原子内态与光场的耦合提供了天然通道, 使静态的原子比特能够与作为飞行比特的光子建立量子连接, 进而构建原

子间量子网络. 此外, 强光学跃迁使原子量子态可通过荧光信号高效读出, 借助先进单光子探测技术, 可实现高保真度的量子态测量, 为复杂量子协议的实施奠定基础. 然而, 自由空间中的中性原子面临囚禁阱深浅和光子收集效率低的限制, 导致荧光探测时间通常长达百微秒量级, 远超过量子态制备和门操作所需时间, 成为网络协议中的主要时间瓶颈. 为突破这一限制, 多个研究团队利用腔量子电动力学(cQED)的强耦合机制, 通过光学谐振腔显著提升了光子收集效率, 实现了快速、高保真度的无损态探测^[6,7]. 该方法还可通过分析腔的透射/反射谱来推断原子状态^[8]. 尽管如此, 现有技术的态读取时间仍需数微秒, 未来仍需发展更快速、更精确的无损探测方案, 以满足量子网络在通信速率和资源效率方面的严苛要求.

针对这一问题, 我们利用精心设计的光纤微腔, 使得微腔模式和原子之间的耦合处于普塞尔(Purcell)区域. 在该区域, 原子的激发能够被高效转化为腔模光子, 同时腔模的耗散速率超过真空拉比振荡, 即cQED模型中腔模与原子的相干光子交换过程, 从而可以在保证高效率收集光子的基础上, 进一步提高系统的光子辐射速率. 利用这一特性, 我们在此之前成功观测到了单原子共振荧光中的两光子纠缠^[9]. 在此基础上, 结合对原子闭循环跃迁的强驱动以及一种低动

引用格式: 黄冬郁, 王健, 李传锋, 等. 中性原子量子信息处理新进展: 超快高保真态读取. 科学通报, 2025, 70: 5377–5379

Huang D, Wang J, Li C, et al. New advances in neutral atom quantum information processing: ultrafast high fidelity state readout (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5377–5379, doi: [10.1360/CSB-2025-5362](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5362)

量转移的激发策略,能够在更短的时间内收集足够数量的原子所辐射的光子,探测器测得的光子计数率信号最高可达18 Mcps (clicks per second);结合对系统稳态的数值模拟,我们推断光纤内的光子收集效率达到了52%。这允许我们能在更短的时间内以更高的保真度判断原子究竟是处于能够被激发光学跃迁的“亮态”,或是与激发光远失谐的“暗态”上^[10]。

在实验上,如图1(a)所示,我们将经过激光冷却后的单个

铷-87原子装载到光纤微腔内的光晶格中,其辐射进腔的光子能够从一侧的腔镜泄漏进入光纤的导模,从而经过后续的滤波和收集光路被单光子计数器探测到。首先,我们从频域和时域分别对光纤微腔-原子系统的普塞尔区域耦合特性进行表征。在这一区域,系统的激发态寿命相较于自由空间原子被增强了 $(2C + 1)$ 倍,其中 $C = g^2/(2\kappa\gamma)$ 为系统的协同因子,包含了cQED模型的几个关键参数:耦合强度 g 、腔模光场和原

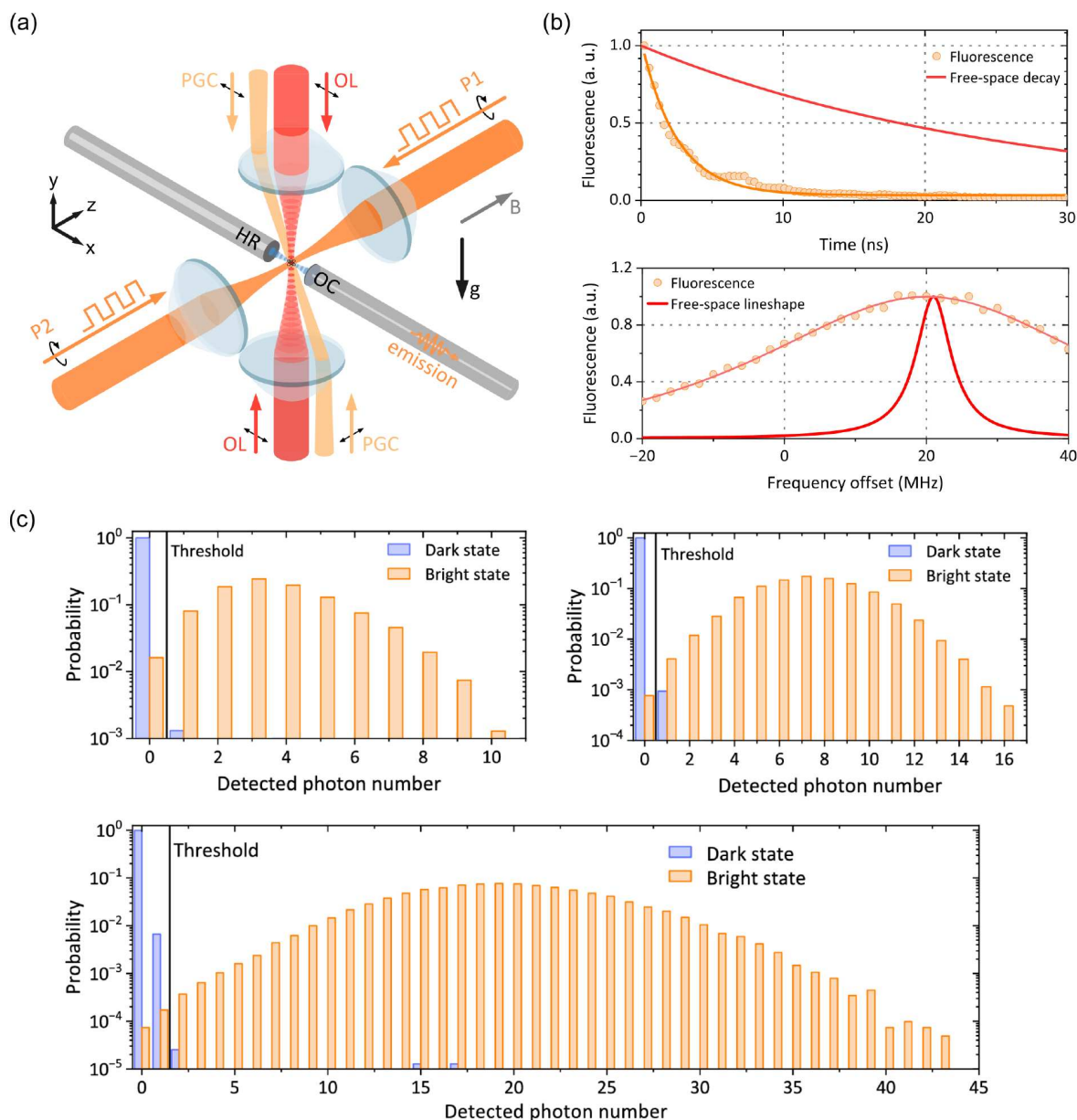


图 1 (网络版彩色)(a) 单原子-光纤微腔装置示意图; (b) 普塞尔区域的系统协同因子表征, 分别为荧光曲线测量(上)与激发态频率展宽测量(下); (c) 态读取过程中的光子计数概率分布, 其所花费时长分别为200 ns(左上)、800 ns(右上)与9 μs(下)^[10]

Figure 1 (Color online) (a) Schematic diagram of the single neutral atom-optical fiber microcavity device. (b) Characterization of the system cooperativity factor within the Purcell regime: measurements of the fluorescence curve (top) and excited state frequency broadening (bottom). (c) Photon counting probability distribution during state readout for integration times of 200 ns (top left), 800 ns (top right), and 9 μs (bottom)^[10]

子极化的衰减速率 κ 和 γ 。通过改变对原子的驱动光频率来测量系统的光子散射率,我们观察到了系统激发态的能级展宽,在时域上与之对应地,通过脉冲激发来测量系统的荧光衰减曲线。如图1(b)所示,两种测量结果都显示,光纤微腔-原子系统的耦合处于深度的普塞尔区域,激发态的衰减速率和能级宽度相较于自由空间的原子均增强了约10倍,系统的协同因子约为4.5,这是高速率光子发射以及超快高保真态读取的必要条件。

在此基础上,我们定义原子的“亮态”和“暗态”分别为 $|5^2S_{1/2}, F=2, m=2\rangle$ 与 $|5^2S_{1/2}, F=1, m=0, \pm 1\rangle$,只有前者能够被态读取时的闭环驱动光激发到激发态 $|5^2P_{3/2}, F=3, m=3\rangle$ 。我们将原子交替制备在亮态和暗态上并施加驱动光,统计原子处在不同状态时探测器所测得的光子计数,结果如图1(c)中的直方图所示。从直方图中可以推断,得益于极高的光子计数率18 Mcps,态读取过程仅需200 ns时即可达到99.1(2)%的保真度,在适当延长态读取的时间后获得了更高的保真度,如在800 ns时可以达到99.91(3)%以及在9 μ s时可以达到99.98(5)%。同时,由于低动量转移的激发策略的应用,在态读取过程中原子丢失的概率始终小于3‰,展现了无损探测的特性,能够与需要“线路中测量”的量子纠错协议相兼容。未来,通过进一步优化原子与光纤微腔的协同因子,以及

使用更高效的单光子探测器,我们预期该系统可实现更快、保真度更高的原子态读取。

除此之外,我们演示了超快态探测对原子态制备的加速作用。由于传统上用于原子态制备的光泵浦过程依赖于概率性、非相干的自发辐射,因此绝大多数时间被浪费在了清除少量非目标态的布居数上。不难想象,如果在光泵浦过程中加入态探测,则可以利用态制备成功的信号来提前结束整个过程,节约所需的时间。由于我们首次使得原子态读取的时间远低于典型的用于原子态制备的光泵浦时间,因此我们演示了将超快态读取与光泵浦态制备相结合,通过实时决定的策略,有效地加快态制备的过程。经过优化,相比于传统的光泵浦方法,我们将“亮态”与“暗态”的制备时间分别缩短到了原来的2/3与1/4,展示了量子信息处理中的多技术协同作用。

利用光纤微腔与中性原子的普塞尔区域耦合,我们同时实现了高效光子收集与高速率的光子辐射,展示了系统作为高性能原子-光子接口,进而作为量子网络节点的应用潜力。在此基础上,我们实现了前所未有的原子态读取速度和保真度,并展示了其对原子态制备过程的加速作用,这将有助于降低量子网络应用中的时间和物理资源消耗^[11,12],为高性能量子网络的建立打下基础。

推荐阅读文献

- 1 Kimble H J. The quantum internet. *Nature*, 2008, 453: 1023–1030
- 2 Wehner S, Elkouss D, Hanson R. Quantum internet: a vision for the road ahead. *Science*, 2018, 362: eaam9288
- 3 Schlosser M, Tichelmann S, Schäffner D, et al. Scalable multilayer architecture of assembled single-atom qubit arrays in a three-dimensional talbot tweezer lattice. *Phys Rev Lett*, 2023, 130: 180601
- 4 Bluvstein D, Evered S J, Geim A A, et al. Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays. *Nature*, 2024, 626: 58–65
- 5 Reiserer A, Rempe G. Cavity-based quantum networks with single atoms and optical photons. *Rev Mod Phys*, 2015, 87: 1379–1418
- 6 Bochmann J, Mücke M, Guhl C, et al. Lossless state detection of single neutral atoms. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 203601
- 7 Deist E, Lu Y H, Ho J, et al. Mid-circuit cavity measurement in a neutral atom array. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 203602
- 8 Gehr R, Volz J, Dubois G, et al. Cavity-based single atom preparation and high-fidelity hyperfine state readout. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 203602
- 9 Wang J, Zhou X L, Shen Z M, et al. Purcell-enhanced generation of photonic bell states via the inelastic scattering off single atoms. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 053401
- 10 Wang J, Huang D Y, Zhou X L, et al. Ultrafast high-fidelity state readout of single neutral atom. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 240802
- 11 Briegel H J, Dür W, Cirac J I, et al. Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 5932–5935
- 12 Steane A M. How to build a 300 bit, 1 giga-operation quantum computer. *Quantum Inf Comput*, 2007, 7: 171–183