

微纳光纤波导冷原子混合系统的荧光关联测量*

冯康杰¹⁾ 王建庭¹⁾ 王立勋¹⁾ 武晓阳¹⁾ 周静¹⁾ 张玉川¹⁾
荣静宇¹⁾ 宋丽军¹⁾²⁾ 李刚¹⁾²⁾ 张鹏飞^{1)2)†} 张天才¹⁾²⁾

1) (山西大学光电研究所, 光量子技术与器件全国重点实验室, 太原 030006)

2) (山西大学, 极端光学省部共建协同创新中心, 太原 030006)

(2025 年 12 月 31 日收到; 2026 年 2 月 9 日收到修改稿)

微纳光纤波导与冷原子耦合的混合量子系统兼具微纳结构局域光场强和冷原子相干性好的优势, 是研究光与物质相互作用、量子信息的重要平台. 本文构建了基于双磁光阱的微纳光纤-冷原子耦合实验系统, 利用微纳光纤波导的倏逝场实现了与冷原子团的高效耦合及荧光收集. 采用光子关联测量技术测量冷原子团辐射荧光的二阶强度关联函数, 其呈现出少光子的反聚束的量子特性. 结合多原子荧光关联理论, 实现了与微纳光纤波导耦合的有效原子数及光与原子相互作用拉比频率的精确表征. 实验结果表明, 通过调节二维磁光阱到三维磁光阱推送光的功率, 可实现微纳光纤表面有效原子数的精确调控, 荧光计数率与有效原子数呈线性关系, 有效原子数控制精度达到 0.14. 另外, 本文系统研究了激发光参数对相互作用的影响, 验证了有效拉比频率的平方与激发光功率、拉比频率与频率失谐量的线性依赖关系. 该研究为微纳光纤表面原子数量的精确操控提供了可靠方法, 也为探索多体辐射效应、制备高品质量子光源及研究非线性量子光学提供了实验依据.

关键词: 微纳光纤波导, 冷原子, 混合量子系统, 荧光关联测量**DOI:** 10.7498/aps.75.20251801**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251801

1 引言

光与原子在单量子水平下的相互作用是进行量子光学、量子信息、量子精密测量等研究的重要基础^[1]. 冷原子具有长的相干时间并且可以与周围环境完美隔离, 已经成为研究量子物理基本问题、原子光谱学、量子模拟、量子信息和精密测量的重要工具^[2]. 微纳结构具有对光场强束缚的天然属性, 并且具有体积小和易于集成的优势, 在实用化方面展现了巨大潜力^[3,4]. 将微纳结构与冷原子系综各自的优势相结合, 构建“混合量子系统”, 可以有效利用微纳结构局域光场的能力增强光与物质的

相互作用, 该系统在量子光学基础研究、量子操控和量子信息处理、精密测量等领域有着重要的应用^[4,5]. 根据光场局域形式可以将光与物质增强耦合的系统分为腔量子电动力学^[6,7](cavity quantum electrodynamics, CQED) 和波导量子电动力学^[8](waveguide quantum electrodynamics, WQED). CQED 系统包括法布里-珀罗腔^[9]、回音壁腔^[6]、光纤腔^[10-12]、光子晶体腔^[13]、纳米梁^[14]、纳米天线^[15]等; WQED 系统包括微纳光纤波导^[4,16-18]、光子晶体波导^[19]、等离激元波导^[20]等.

一维微纳波导对其传输光场的强烈束缚, 极大地增强了光与原子的耦合效率^[21]. 微纳光纤波导(optical nanofiber) 是一种典型的一维微纳波导,

* “量子通信与量子计算机”国家科技重大专项(批准号: 2023ZD0300400)、国家重点研发计划(批准号: 2021YFA1402002)、国家自然科学基金(批准号: U21A6006, U21A20433, 12574395, 12504457, 92465201, 12474360, 92265108)和山西省基础研究计划(批准号: 202203021223003)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangpengfei@sxu.edu.cn

可以通过将标准单模光纤加热熔融拉伸而得到^[22]. 当微纳光纤波导的腰锥区域直径与光波长相当时, 导波模式在光纤表面以倏逝场的形式传输^[21,23]. 微纳光纤波导表面倏逝场既可用于构建光学偶极阱囚禁原子, 又可以高效收集原子发出的光子, 从而成为光子和原子相互作用界面的优秀系统^[24]. 这样的系统可用于单原子非线性^[25]、原子数量的扩展^[16,17]、原子阵列间的布拉格反射^[26], 波导的手性特征^[27]、集体效应^[28]、光机械特性^[29,30]、虚磁场效应^[31,32]等研究. 微纳光纤波导耦合原子阵列的系统不仅丰富了光场和原子的调控手段, 用于更多新奇物理现象的研究和应用, 还在原子间长程相互作用^[4]、多体物理^[8]、量子存储^[33]、关联测量^[8,34]、非经典态^[35]、量子纠缠^[28]、量子非互易器件^[36]、原子阵列内态调控^[31,37]等多方面展现出巨大的应用潜力.

基于微纳光纤波导与原子耦合的系统展现出非线性和多体物理等丰富特性, 而关联测量手段对光子统计特性进行表征, 是探测和验证量子特性的有力工具^[38,39]. 目前关联测量在微纳光纤波导冷原子混合系统中的应用主要涵盖以下几个方面: 少原子的探测、少光子的探测、集体效应的探测、非线性过程的表征以及原子温度的测量. 关联测量最早被应用在少原子的探测中, 2008年 Nayak 和 Hakuta^[40] 首先利用一维波导实现了单原子探测和光子反聚束现象的观测. 同年, Le Kien 和 Hakuta^[41] 从理论上系统地计算了多原子荧光耦合到一维波导中光场的关联函数, 揭示了其与原子数 N 的高阶依赖关系. 2009年 Nayak 等^[42] 实验观测了少数原子的共振荧光的光子关联, 研究发现在光纤单端测量时, 随原子数增加, 光子统计行为从反聚束转变为聚束; 而在光纤两端测量时, 则始终呈现类似反聚束的行为. 这一发现不仅揭示了单原子量子效应与多原子干涉效应的竞争机制, 也为通过光子关联测量估算微纳光纤表面原子数奠定了基础. 在少光子探测方面, 关联测量是区分光源性质的核心技术. 单光子^[25,43]、双光子态^[34,43] 通常基于四波混频^[43] 和光子阻塞^[44] 产生. 对于通过四波混频产生的光子对, 关联测量被用于验证光子对的强关联性^[45], 并通过预报技术验证单光子源的纯度^[46]. 另一方面, 对于利用非线性效应产生的光子阻塞现象, 二阶关联函数是判断系统是否进入单光子阻塞或双光子阻塞状态的直接判据^[25]. 近年来, 随着对多原

子系综复杂的干涉行为的深入研究^[44,47], 关联测量广泛用于集体效应的探测当中^[8]. 在大原子数系综的集体效应当中, 超辐射^[48,49] 和光子阻塞^[50-53] 是两种主要现象, 它们可以通过关联测量表现出的光子聚束或反聚束特征来区分. 在手性波导量子电动力学系统中^[47,48,51,52], 利用原子系综的集体非线性响应, 可以通过改变原子数量实现光子统计从反聚束到强聚束的连续转换. 这些研究显示出在 WQED 系统中实现非经典光场的巨大潜力. 关联测量还可以用于电磁感应透明、克尔效应、四波混频等非线性光学^[45-54] 过程的表征. 研究系统也从二能级量子发射器与单一频率光子相互作用的基础非线性系统, 发展到多光子系统^[55]、多能级系统^[56] 等高阶非线性系统中. 最后, 关联测量还被应用于原子温度的测量^[57]. 通过测量二阶关联函数的时间宽度, 可以推断原子穿越光纤倏逝场模式的速度分布, 从而精确测定冷原子云的温度.

本文旨在搭建一套稳定可控的微纳光纤波导-冷原子耦合实验平台, 并通过光子关联测量技术获得少原子辐射荧光的反聚束效应, 精确标定与微纳光纤波导耦合的有效原子数. 实验中使用双磁光阱 (magneto-optical trap, MOT) 系统, 将二维磁光阱 (2D-MOT) 中原子推送至与微纳光纤波导重合的三维磁光阱 (3D-MOT) 中, 实现冷原子团的稳定装载及其与微纳光纤波导的耦合^[58]. 实验得到关联测量结果并利用理论^[41,42] 进行拟合, 精确测量有效原子数和光与原子相互作用的拉比频率. 在此基础上系统研究了有效原子数、拉比频率及荧光计数率等关键参数随推送光功率、激发光功率及失谐量的变化关系. 这项工作为精确操控微纳光纤波导表面的原子数量提供了一种可靠方法, 这为未来基于该平台研究超辐射^[48,49]、光子阻塞^[50-53] 多体量子现象和非经典光源^[25,34,43] 提供了实验依据.

2 实验装置

为了实现微纳光纤波导的倏逝场与冷原子团的高效耦合, 我们搭建了真空环境的微纳光纤波导与 3D-MOT 冷原子团重合的实验装置, 其示意图如图 1(a) 所示. 微纳光纤波导采用“火焰刷”技术制备^[18], 其腰锥部分直径均匀分布, 约为 450 nm, 长度约为 3 mm. 由于腰锥部分的直径小于波长, 所以其表面的倏逝场得到极大增强, 可以实现对原

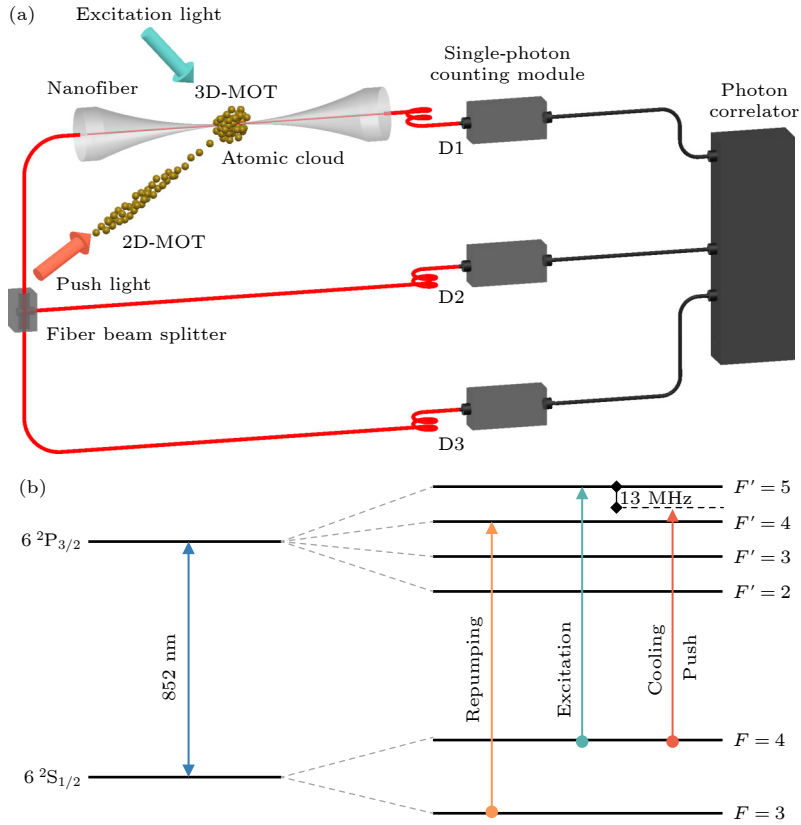


图 1 (a) 微纳光纤-冷原子混合系统关联测量的实验装置示意图, 红色实线代表光纤, 黑色实线代表同轴电缆; (b) 铯原子 D2 线能级结构及实验所使用激光的跃迁频率

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the nanofiber-cold atom hybrid system, red lines represent optical fibers, black lines represent coaxial electric cables; (b) energy levels of the cesium D2 line and frequencies of laser beams.

子的俘获和高效的荧光收集^[40,41]. 在真空度 3.7×10^{-9} mbar 的超高真空腔室中搭建 3D-MOT. 与此同时, 微纳光纤波导也被放置在此超高真空腔室中. 3D-MOT 冷原子团与微纳光纤波导腰锥重合. 3D-MOT 利用一对竖直放置的反亥姆霍兹线圈和三对正交的圆偏振 MOT 光束构成. MOT 激光包括冷却光 (cooling light) 和再泵浦光 (repumping light). 冷却光相对于铯原子跃迁线 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 负失谐 13 MHz (图 1(b) 中红色箭头), 再泵浦光与跃迁线 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=4)$ 共振 (图 1(b) 中橙色箭头). 为了在获得稳定冷原子团的同时保持较高背景真空度, 在 3D-MOT 的基础上搭建 2D-MOT, 因此真空系统整体采用双 MOT 系统^[58]. 2D-MOT 所在真空腔室的真空度为 1.0×10^{-8} mbar. 2D-MOT 利用两组永磁体产生的二维四极磁场以及两对正交的 MOT 激光形成雪茄型冷原子团. 2D-MOT 和 3D-MOT 所在的真空腔室之间利用差分管连接 (图 1 中未画出), 从而形成稳定的压强差. 在获得 2D-MOT 冷原子团后, 利

用推送光 (push light) 将 2D-MOT 束缚的冷原子通过差分管推送至 3D-MOT 获得稳定的冷原子团. 推送光的频率与冷却光相同 (图 1(b) 中红色箭头).

3D-MOT 中冷原子团采用一束激发光 (excitation light) (图 1(b) 中绿色箭头) 激发. 激发光的入射方向与微纳光纤垂直, 频率与跃迁线 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 共振. 冷原子团受激发后辐射出的荧光耦合进入微纳光纤^[21]. 微纳光纤一端的荧光用单光子探测器 (single-photon counting module, SPCM-AQRH) D1 进行测量; 微纳光纤另一端荧光经 50:50 光纤分束器 (fiber beam splitter) 分为两路, 分别由单光子探测器 D2 和 D3 探测. 通过关联器 (photon correlator, P7888) 对探测器 D1-D2 和 D1-D3 进行关联测量, 即可获得冷原子团荧光的光子统计特性.

考虑 N 个二能级原子通过倏逝场耦合至微纳光纤波导, 其集体辐射行为可由多原子荧光二阶关联函数描述. 在马尔可夫近似下, 忽略原子间直接偶极-偶极相互作用, 仅保留通过波导模式介导的相干

耦合, 可得二阶关联函数 $g_N^{(2)}(\tau)$ [40-42], 其表达式为

$$g_N^{(2)}(\tau) \propto N g_{\text{single}}^{(2)}(\tau) + N^2 \left[\mu_0 + \mu |g_{\text{single}}^{(1)}(\tau)|^2 \right], \quad (1)$$

具体推导过程见补充材料 (online). N 为有效原子数, τ 为延迟时间. (1) 式第 1 项 $N g_{\text{single}}^{(2)}(\tau)$ 源于单原子量子效应, 描述了光子的反聚束特性, 其强度与有效原子数 N 成正比. (1) 式第 2 项源于不同原子辐射场之间的一阶干涉, 描述了光子的聚束特性, 其强度与 N^2 成正比. μ_0 和 μ 是反映微纳光纤倏逝场几何结构和原子分布特征的参数, 用于自由空间中的原子荧光关联理论对于微纳光纤波导系统的修正. $g_{\text{single}}^{(1)}(\tau)$ 和 $g_{\text{single}}^{(2)}(\tau)$ 分别是单原子的一阶振幅关联函数和二阶强度关联函数 [41], 其解析形式由光学布洛赫方程给出, 表达式分别为

$$g_{\text{single}}^{(1)}(\tau) = e^{-\frac{\gamma}{2}\tau} \sin^2 \left(\frac{\Omega_{\text{eff}}}{2} |\tau| \right), \quad (2)$$

$$g_{\text{single}}^{(2)}(\tau) = 1 - e^{-\frac{3\gamma}{4}\tau} \left[\cos(\Omega_{\text{eff}}\tau) + \frac{3\gamma}{4\Omega_{\text{eff}}} \sin(\Omega_{\text{eff}}\tau) \right], \quad (3)$$

其中, γ 为原子的总自发辐射衰减率, $\Omega_{\text{eff}} = \sqrt{\Omega_0^2 + \Delta^2}$ 为广义拉比频率, 表征光与原子相互作用的强度. $\Omega_0 = \mathbf{d} \cdot \mathbf{E}/\hbar$ 为共振拉比频率, 大小正

比于驱动光场的电场振幅 E , $\Delta = \omega - \omega_0$ 为激发光频率 ω 相对于原子共振频率 ω_0 的失谐量. 利用上述理论拟合实验测量的二阶关联函数, 可获得微纳光纤波导表面有效原子数和拉比频率.

3 微纳波导耦合有效原子数的精确控制

首先, 我们对冷原子团耦合进入微纳光纤两端荧光进行二阶关联测量, 并利用微纳光纤表面多原子荧光关联函数对测量结果进行拟合, 从而精确表征其有效原子数. 图 2(a) 为单光子探测器 D1 和 D2 的二阶强度关联结果. 由下到上, 棕、红、橙、绿及蓝色实心点分别对应推送光功率为 50, 100, 200, 800 和 1200 μW 的测量结果, 实线为理论拟合曲线, 激发光功率为 0.01 μW . 由图可知, 在延迟时间 $\tau = 0$ 处出现明显的反聚束凹陷, 呈现了少原子辐射荧光的量子特性. 随着延迟时间 τ 的延长, 曲线两侧呈现频率 Ω_{eff} 的拉比振荡, Ω_{eff} 对应于光与原子的相互作用强度, 拟合得到的有效原子数 N 分别为 0.47 ± 0.23 , 0.96 ± 0.19 , 1.82 ± 0.17 , 2.29 ± 0.16 和 2.36 ± 0.13 . 图 2(a) 中, 随着原子数增加, 光子计数率增大, 其光子统计涨落降低.

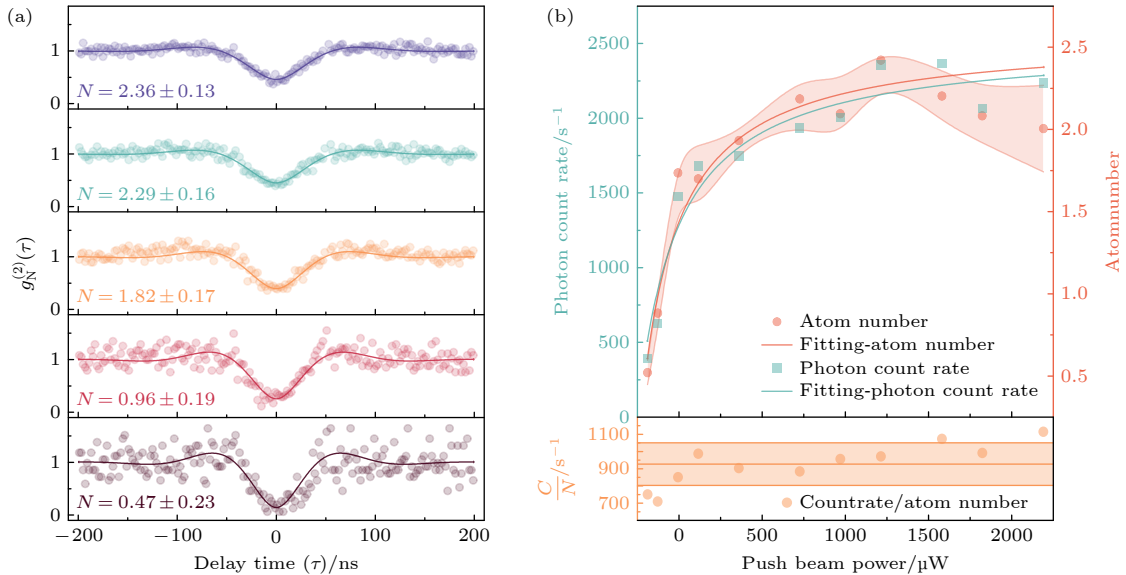


图 2 (a) 不同有效原子数 N 下探测器 D1-D2 二阶强度关联测量结果; (b) 荧光计数率与有效原子数随推进光功率的变化关系, 实线为光学布洛赫方程稳态解理论拟合曲线, 阴影区为 D1-D2 和 D1-D3 两组关联测量结果的标准差; 下方插图显示单原子荧光计数率与有效原子数的比值 C/N 随推进光功率的变化趋势, 水平线为 C/N 均值 927, 标准差 124

Fig. 2. (a) Evolution of the second-order intensity correlation function between detectors D1 and D2 for effective atom number N ; (b) dependence of fluorescence count rate and effective atom number on the push beam power; the solid lines represent the theoretical fittings, the shaded area indicates the standard deviation; inset represents variation of ratio of single-atom fluorescence count rate to effective atom number C/N with push beam power, the horizontal line represents the mean value of C/N (927) with a standard deviation of 124.

拟合探测器 D1-D2 和 D1-D3 两组二阶强度关联结果, 经平均后得到的有效原子数随推送光功率变化关系由图 2(b) 所示. 综合全部测量结果, 有效原子数控制精度达到 0.14. 实验测得的 3 个探测器的总荧光计数率随推送光功率的变化关系由图 2(b) 所示. 荧光计数率和有效原子数随着推进光功率增大的变化趋势一致, 均呈现出先增大后趋于饱和的趋势. 红色和绿色实线为光学布洛赫方程稳态解理论对实验数据拟合的结果. 图 2(b) 中阴影区表示两组测量结果的标准差. 图 2(b) 下方插图中橙色实心圆点表示荧光计数率 C 与有效原子数 N 的比值, $C/N = 927 \pm 124$, 其两者之间呈线性相关. 这一结果表明, 通过调节推送光功率可以实现与微纳光纤耦合有效原子数的精密控制.

4 激发光参数对光与原子相互作用强度的影响

4.1 激发光功率对光与原子相互作用强度的影响

我们系统地研究了激发光功率和频率失谐量对微纳光纤表面光与原子相互作用强度的影响, 其中激发光功率是决定相互作用强度的关键参数. 在推送光功率为 $1000 \mu\text{W}$ 时, 随着激发光功率增大, 图 3(a) 中荧光计数率呈现先上升后下降的非单调变化趋势. 当激发光功率大于 $0.01 \mu\text{W}$ 时, 荧光计数率开始下降. 这一现象是单原子荧光饱和效应与原子数受强光激发损失共同作用的竞争结果. 在低功率阶段, 激发光功率增大使得受激发原子数增加, 而激发光对原子加热损失的效应不显著, 因此荧光计数率开始增大. 激发光功率继续增大, 由于冷原子团规模的限制无法激发更多原子, 因此荧光计数逐渐趋于饱和. 而当激发光功率处于高功率阶段, 强激发光带来的共振加热效应导致原子损失, 从而引起荧光计数率下降.

通过关联测量获得的有效原子数随激发光功率的变化关系如图 3(a) 所示. 有效原子数随着激发光功率的增大并没有和荧光计数率表现出同样的变化趋势. 有效原子数呈现出持续的下降趋势, 由 3.9 下降至 1.0. 这是因为有效原子数受到 3D-MOT 中的原子总数和原子飞越倏逝场区域渡越时间的共同影响. 在低激发光功率下, 光场加热效应较弱, 原子热运动速度较慢, 飞越微纳光纤倏逝场

的时间较长, 反直觉地表现为较高的有效原子数; 随着功率继续增大, 强激发光场会加速原子热运动, 导致原子动能增大、渡越时间缩短, 甚至使原子克服 MOT 束缚而逃逸, 最终导致探测到的有效原子数持续减少.

通过关联测量获得的拉比频率的平方随激发光功率的变化关系如图 3(b) 所示. 当失谐量 $\Delta = 0$ 时, 有效拉比频率 $\Omega_{\text{eff}} = \Omega_0 = \mathbf{d} \cdot \mathbf{E}/\hbar$, 由于激发光功率 P 正比于电场强度的平方, 即 $P \propto |\mathbf{E}|^2$, 理论上拉比频率的平方正比于激发光功率, 即 $\Omega_0^2 \propto P$. 当激发光功率小于 $0.01 \mu\text{W}$ 时, 拉比频率的平方 (Ω_{eff}^2) 随激发光功率呈现出良好线性关系; 当激发光功率大于 $0.01 \mu\text{W}$, 实验测得拉比频率的平方低于理论预期, 可能的原因是由于激发光加热原子造成有效原子数减少, 而与原子相互作用的有效光强较小, 造成实验结果与理论预期出现较大偏差.

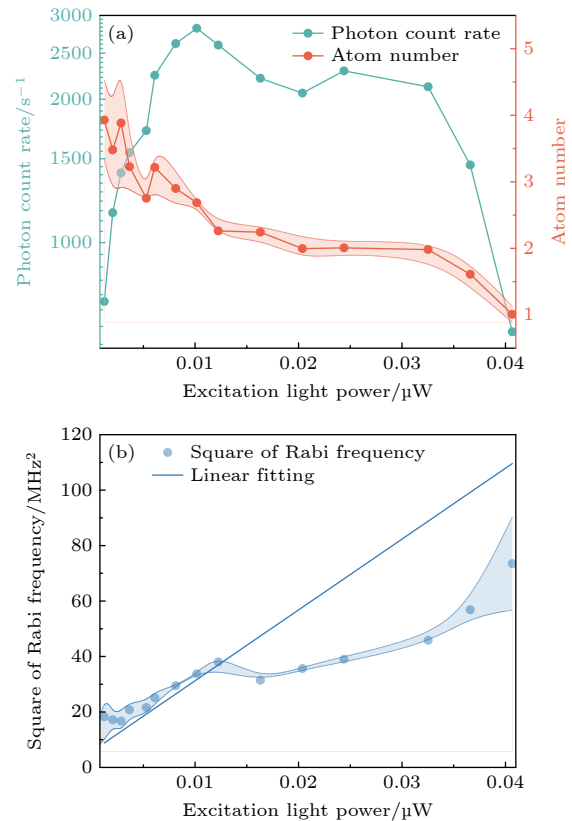


图 3 (a) 荧光计数率和有效原子数随激发光功率的变化关系; (b) 拉比频率平方与激发光功率的关系. 蓝色实线为线性拟合, 阴影区为 D1-D2 和 D1-D3 两组测量结果的标准差
Fig. 3. (a) Photon count rate and effective atom number as a function of excitation light power; (b) relationship between the square of the effective Rabi frequency and excitation light power. The solid blue curve represents a linear fitting, the shaded area indicates the standard deviation.

4.2 激发光功率对光与原子相互作用强度的影响

我们还研究了激发光频率相对于原子共振频率的失谐量绝对值 $|\Delta|$ 对光与原子相互作用强度的影响. 实验中推送光的功率固定为 $1000 \mu\text{W}$, 激发光功率固定为 $0.01 \mu\text{W}$. 通过关联测量获得的拉比频率在正失谐与负失谐下均随失谐量绝对值 $|\Delta|$ 增大呈现线性上升, 如图 4 所示, 变化趋势与拉比频率 $\Omega_{\text{eff}} = \sqrt{\Omega_0^2 + \Delta^2}$ 与失谐量的关系一致. 当失谐量较大时 ($|\Delta| \gg \Omega_0$), 广义拉比频率近似等于失谐量的绝对值 ($\Omega_{\text{eff}} \approx |\Delta|$), 从而呈现出显著的线性特征. 另外, 实验测得有效原子数随失谐量绝对值 $|\Delta|$ 增大而下降, 如图 4 所示.

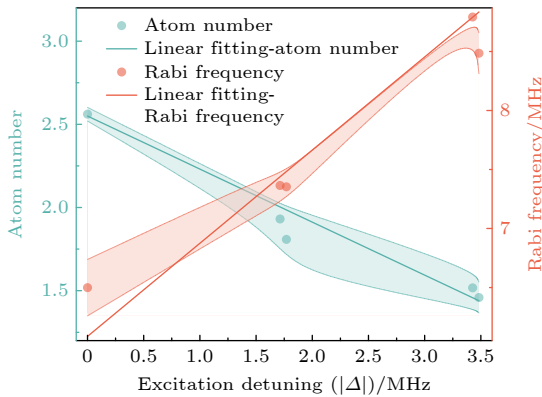


图 4 激发光频率失谐量 $|\Delta|$ 对有效原子数及拉比频率的影响. 实线为线性拟合, 阴影区为 D1-D2 和 D1-D3 两组测量结果的标准差

Fig. 4. Effect of excitation light frequency detuning on effective atom number and Rabi frequency. The solid lines represent linear fittings, and the shaded area indicates the standard deviation.

5 总结与展望

本文基于双 MOT 的微纳光纤波导-冷原子混合系统, 实现了微纳光纤倏逝场与冷原子团的高效耦合, 并通过关联测量系统地研究了耦合进入微纳光纤波导的冷原子荧光的光子关联统计特性. 二阶强度关联函数表现出明显的反聚束效应, 与多原子荧光关联理论得到很好的符合. 实验通过调节 2D-MOT 到 3D-MOT 推送光的功率, 实现 3D-MOT 中与微纳光纤波导耦合的有效原子数的精确测量, 而且实现了有效原子数从 0.52 到 2.42 的精确控制. 有效原子数控制精度为 0.14. 此外, 实验系统地探究了激发光功率和频率失谐量对微纳光纤波

导表面光与原子相互作用强度的影响, 验证了拉比频率平方与激发光功率、拉比频率与激发光频率失谐量之间的线性关系. 本工作为基于 WQED 的多体辐射效应^[48,49]、高品质的量子光源制备^[25,34,43] 和非线性量子光学研究^[50-53] 提供了实验依据.

参考文献

- [1] Liu G X, Zhou W J, Gromyko D, Huang D, Dong Z G, Liu R M, Zhu J F, Liu J F, Qiu C W, Wu L 2025 *Appl. Phys. Rev.* **12** 011308
- [2] Yang J H, He X D, Guo R J, Xu P, Wang K P, Sheng C, Liu M, Wang J, Derevianko A, Zhan M S 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 123201
- [3] Resmi M, Bashaiah E, Suman S, Yalla R 2024 *Opt. Quantum Electron.* **56** 1341
- [4] Nayak K P, Sadgrove M, Yalla R, Kien F L, Hakuta K 2018 *J. Opt.* **20** 073001
- [5] Chang D E, Douglas J S, González-Tudela A, Hung C L, Kimble H J 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 031002
- [6] Reiserer A, Remppe G 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 1379
- [7] Li G, Zhang P F, Yang P F, Wang Z H, Zhang T C 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 0327005 (in Chinese) [李刚, 张鹏飞, 杨鹏飞, 王志辉, 张天才 2022 *光学学报* **42** 0327005]
- [8] Sheremet A S, Petrov M I, Iorsh I V, Poshakinskiy A V, Poddubny A N 2023 *Rev. Mod. Phys.* **95** 015002
- [9] Wang D Q, Kelkar H, Martin-Cano D, Utikal T, Götzinger S, Sandoghdar V 2017 *Phys. Rev. X* **7** 021014
- [10] Horikawa S, Yang S, Tanaka T, Aoki T, Kato S 2024 *Rev. Sci. Instrum.* **95** 073103
- [11] Hu Y D, Song L J, Wang C X, Zhang P, Zhou J, Li G, Zhang P F, Zhang T C 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 234203 (in Chinese) [胡裕栋, 宋丽军, 王晨曦, 张沛, 周静, 李刚, 张鹏飞, 张天才 2022 *物理学报* **71** 234203]
- [12] Guo C Z, Wang C X, Zhou J, Li G, Zhang P F, Zhang T C 2025 *J. Quantum Opt.* **31** 041003 (in Chinese) [郭成哲, 王晨曦, 周静, 李刚, 张鹏飞, 张天才 2025 *量子光学学报* **31** 041003]
- [13] Chang W H, Chen W Y, Chang H S, Hsieh T P, Chyi J I, Hsu T M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 117401
- [14] Yang D Q, Duan B, Liu X, Wang A Q, Li X G, Ji Y F 2020 *Micromachines* **11** 72
- [15] Chikkaraddy R, De Nijs B, Benz F, Barrow S J, Scherman O A, Rosta E, Demetriadou A, Fox P, Hess O, Baumberg J J 2016 *Nature* **535** 127
- [16] Vetsch E, Reitz D, Sagué G, Schmidt R, Dawkins S T, Rauschenbeutel A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 203603
- [17] Goban A, Choi K S, Alton D J, Ding D, Lacroûte C, Pototschnig M, Thiele T, Stern N P, Kimble H J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 033603
- [18] Zhang P F, Cheng F, Wang X, Song L J, Zou C L, Li G, Zhang T C 2018 *Opt. Express* **26** 31500
- [19] Weiss L, Gritsch A, Merkel B, Reiserer A 2021 *Optica* **8** 40
- [20] Chang D E, Sørensen A S, Demler E A, Lukin M D 2007 *Nat. Phys.* **3** 807
- [21] Zhang J B, Fang H B, Wang P, Fang W, Zhang L, Guo X, Tong L M 2024 *Photonics Insights* **3** R02
- [22] Hoffman J E, Ravets S, Grover J A, Solano P, Kordell P R, Wong-Campos J D, Orozco L A, Rolston S L 2014 *AIP Adv.* **4** 067124
- [23] Sagué G, Vetsch E, Alt W, Meschede D, Rauschenbeutel A

- 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 163602
- [24] Nayak K P, Melentiev P N, Morinaga M, Kien F L, Balykin V I, Hakuta K 2007 *Opt. Express* **15** 5431
- [25] Wu Z M, Li J H, Wu Y 2024 *Phys. Rev. A* **109** 033709
- [26] Corzo N V, Gouraud B, Chandra A, Goban A, Sheremet A S, Kupriyanov D V, Laurat J 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 133603
- [27] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S, Rauschenbeutel A, Schneeweiss P, Volz J, Pichler H, Zoller P 2017 *Nature* **541** 473
- [28] Liedl C, Pucher S, Tebbenjohanns F, Schneeweiss P, Rauschenbeutel A 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 163602
- [29] Song L J, Wang C X, Hu Y D, Zhou J, Zhang Q, Zou C L, Li G, Zhang P F, Zhang T C 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 033801
- [30] Tebbenjohanns F, Jia J H, Antesberger M, Prasad A S, Pucher S, Rauschenbeutel A, Volz J, Schneeweiss P 2023 *Phys. Rev. A* **108** L031101
- [31] Albrecht B, Meng Y, Clausen C, Dareaux A, Schneeweiss P, Rauschenbeutel A 2016 *Phys. Rev. A* **94** 061401
- [32] Chen X W, Wang C X, Wang J T, Feng K J, Zhou J, Zhang Y C, Rong J Y, Li G, Zhang P F, Zhang T C 2025 *Acta Opt. Sin.* **45** 0527001 (in Chinese) [陈小伟, 王晨曦, 王建庭, 冯康杰, 周静, 张玉川, 荣静宇, 李刚, 张鹏飞, 张天才 2025 *光学学报* **45** 0527001]
- [33] Corzo N V, Raskop J, Chandra A, Sheremet A S, Gouraud B, Laurat J 2019 *Nature* **566** 359
- [34] Cordier M, Schemmer M, Schneeweiss P, Volz J, Rauschenbeutel A 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 183601
- [35] Leong W S, Xin M J, Chen Z L, Chai S J, Wang Y, Lan S Y 2020 *Nat. Commun.* **11** 5295
- [36] Pucher S, Liedl C, Jin S, Rauschenbeutel A, Schneeweiss P 2022 *Nat. Photon.* **16** 380
- [37] Vylegzhanin A, Brown D J, Abdrakhmanov S, Chormaic S N 2026 *Phys. Rev. A* **113** 023111
- [38] Ferreira D, Bachelard R, Guerin W, Kaiser R, Fouché M 2020 *Am. J. Phys.* **88** 831
- [39] Lu Z G, Shang C, Wu Y, Lü X Y 2023 *Phys. Rev. A* **108** 053703
- [40] Nayak K P, Hakuta K 2008 *New J. Phys.* **10** 053003
- [41] Le Kien F, Hakuta K 2008 *Phys. Rev. A* **77** 033826
- [42] Nayak K P, Le Kien F, Morinaga M, Hakuta K 2009 *Phys. Rev. A* **79** 021801
- [43] Qu C, Zhang S H, Li X X, Ma Y F, Yin B, Yang T, Wei Z T 2023 *Opt. Lett.* **48** 2813
- [44] Fang Y L, Zheng H X, Baranger H U 2014 *EPJ Quantum Technol.* **1** 3
- [45] Cui L, Li X Y, Guo C, Li Y H, Xu Z Y, Wang L J, Fang W 2013 *Opt. Lett.* **38** 5063
- [46] Shukhin A A, Keloth J, Hakuta K, Kalachev A A 2020 *Phys. Rev. A* **101** 053822
- [47] Mahmoodian S, Čepulkovskis M, Das S, Lodahl P, Hammerer K, Sørensen A S 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 143601
- [48] Bach C, Tebbenjohanns F, Liedl C, Schneeweiss P, Rauschenbeutel A 2026 *Phys. Rev. Lett.* **136** 063402
- [49] Jahnke F, Gies C, Aßmann M, Bayer M, Leymann H A M, Foerster A, Wiersig J, Schneider C, Kamp M, Höfling S 2016 *Nat. Commun.* **7** 11540
- [50] Tian G Q, Zheng L L, Zhan Z M, Nori F, Lü X Y 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 153604
- [51] Prasad A S, Hinney J, Mahmoodian S, Hammerer K, Rind S, Schneeweiss P, Sørensen A S, Volz J, Rauschenbeutel A 2020 *Nat. Photonics* **14** 719
- [52] Lu Z G, Wu Y, Lü X Y 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 013602
- [53] Flayac H, Savona V 2017 *Phys. Rev. A* **96** 053810
- [54] Türschmann P, Le Jeannic H, Simonsen S F, Haakh H R, Göttinger S, Sandoghdar V, Lodahl P, Rotenberg N 2019 *Nanophotonics* **8** 1641
- [55] Elliott A, Ngaha J, Parkins S, Aoki T 2025 arXiv: 2510.25331 [quant-ph]
- [56] Gu W J, Huang H, Yi Z, Chen L, Sun L H, Tan H T 2023 *Phys. Rev. A* **108** 053718
- [57] Grover J A, Solano P, Orozco L A, Rolston S L 2015 *Phys. Rev. A* **92** 013850
- [58] Li Z L, Shi Z L, Wang P J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 126701 (in Chinese) [李子亮, 师振莲, 王鹏军 2020 *物理学报* **69** 126701]

Fluorescence correlation measurement of hybrid system based on nanofiber and cold atom^{*}

FENG Kangjie¹⁾ WANG Jianting¹⁾ WANG Lixun¹⁾ WU Xiaoyang¹⁾
 ZHOU Jing¹⁾ ZHANG Yuchuan¹⁾ RONG Jingyu¹⁾ SONG Lijun¹⁾²⁾
 LI Gang¹⁾²⁾ ZHANG Pengfei^{1)2)†} ZHANG Tiancai¹⁾²⁾

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

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 31 December 2025; revised manuscript received 9 February 2026)

Abstract

The hybrid quantum system integrating optical nanofibers (ONFs) with cold atoms has emerged as a paramount platform for investigating atom-light interactions and advancing quantum information processing, benefiting from the strong local field confinement of nanostructures and the long coherence times of laser-cooled atoms. In this work, we experimentally demonstrate a robust and controllable ONF-cold atom interface based on a dual-magneto-optical trap (MOT) configuration and perform in-situ characterization via photon correlation measurements. The dual-MOT setup consists of a two-dimensional MOT (2D-MOT) and a three-dimensional MOT (3D-MOT), ensuring a robust environment for efficient coupling between a cold cesium ensemble and the ONF. The ONF, fabricated with a uniform waist diameter of approximately 450 nm, facilitates enhanced evanescent field interactions for both atom excitation and high-efficiency fluorescence collection. Cold cesium atoms are trapped in the 3D-MOT, which is spatially overlapped with the ONF waist region. Fluorescence emitted by the atom ensemble is efficiently coupled into both ends of the ONF, and second-order intensity correlation measurements are performed on the collected photons.

By analyzing the second-order correlation function and fitting the data to multi-atom correlation theory, we observe a pronounced anti-bunching dip at zero time delay, a clear signature of the quantum nature of emission from a few-atom ensemble. This method allows for the simultaneous and precise determination of the effective atom number and the effective Rabi frequency of the atom-light interaction. We demonstrate that the effective atom number can be finely tuned from 0.52 to 2.42 by adjusting the power of the push beam that transports atoms from the 2D-MOT to the 3D-MOT, achieving a remarkable control precision of ± 0.14 . Furthermore, we systematically investigate the dependence of the atom-light interaction on the excitation laser's power and frequency detuning. The fluorescence count rate exhibits a non-monotonic behavior with increasing excitation power; it initially increases due to higher excitation rates but subsequently decreases at higher powers due to light-induced heating and atom loss. We also verified that the square of the effective Rabi frequency scales linearly with the excitation power, while the effective Rabi frequency increases linearly with the absolute value of detuning. This work establishes a reliable and quantitative method for calibrating essential parameters in waveguide quantum electrodynamics systems. Our results provide experimental evidence for future studies of collective radiation, quantum light sources and nonlinear quantum optics in fiber-integrated atomic platforms.

Keywords: optical nanofiber, cold atoms, hybrid quantum system, photon-correlation measurements

DOI: [10.7498/aps.75.20251801](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251801)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251801](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251801)

^{*} Project supported by the Quantum Science and Technology—National Science and Technology Major Program (Grant No. 2023ZD0300400), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFA1402002), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U21A6006, U21A20433, 12574395, 12504457, 92465201, 12474360, 92265108), and the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202203021223003).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangpengfei@sxu.edu.cn



微纳光纤波导冷原子混合系统的荧光关联测量

冯康杰 王建庭 王立勋 武晓阳 周静 张玉川 荣静宇 宋丽军 李刚 张鹏飞 张天才

Fluorescence correlation measurement of hybrid system based on nanofiber and cold atom

FENG Kangjie WANG Jianting WANG Lixun WU Xiaoyang ZHOU Jing ZHANG Yuchuan RONG Jingyu SONG Lijun LI Gang ZHANG Pengfei ZHANG Tiancai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100402 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251801

CSTR: 32037.14.aps.75.20251801

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于磁光阱中 ^6Li 冷原子的真空度测量

Vacuum pressure measurement based on ^6Li cold atoms in a magneto-optical trap

物理学报. 2022, 71(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212204>

电子/离子成像技术在冷原子分子及相关领域中的应用

Electron/ion imaging technology and its applications in cold atoms, molecules, and related fields

物理学报. 2025, 74(15): 153701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250415>

基于 ^7Li 冷原子操控的超高真空测量

Ultra-high vacuum measurement based on ^7Li cold atoms manipulation

物理学报. 2024, 73(22): 220601 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241215>

超导-冷原子复合系统的研究进展

Research progress of superconductor and cold atoms hybrid quantum system

物理学报. 2023, 72(20): 200306 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230985>

相互作用费米子的量子模拟

Quantum simulation of interacting fermions

物理学报. 2022, 71(22): 226701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221756>

量子存储性能及应用分析

Performance and application analysis of quantum memory

物理学报. 2023, 72(20): 206701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231203>