基于阱集成光子学的离子荧光收集

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41163.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于阱集成光子学的离子荧光收集。 导读

近日，美国麻省理工学院John Chiaverini团队展示了一种基于阱集成光子学的囚禁离子荧光收集技术。研究团队设计了一种集成波导光栅，用于将被捕获离子发出的光子高效耦合到微加工离子阱芯片中的单一光学模式中，该技术为囚禁离子量子系统的稳定性、可重复性与规模化集成提供了新路径。该研究成果近日发表于国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》，题为Collection of fluorescence from an ion using trap-integrated photonics，MIT的Felix W. Knollmann为论文第一兼通讯作者。

研究背景

在量子信息处理中，离子阱是重要的量子态操作平台，其光学跃迁可实现量子信息在物质与光子间的转换。而将离子自发辐射光高效收集到单模结构，是量子纠缠生成、传感及分布式计算的关键。现有体块光学收集方案虽能验证远程纠缠，却受相位不稳定、模式匹配难及系统差异性影响，无法扩展到大量纠缠对需求，也难以构建多粒子纠缠态或实现大量量子比特快速耦合。

集成光学为解决上述问题提供了可行路径：例如，采用芯片集成光栅可在缩小器件尺寸的同时匹配自由空间光学的数值孔径，并借助单模波导结构实现对光子的集成化操控。然而，现有集成方案仍存在显著瓶颈——难以针对离子短波长跃迁设计出具有低损耗特性与亚波长尺度结构的光子器件，光栅性能优化对收集效率的提升效果有限，且制备过程中的结构偏差易导致性能退化。这些问题严重制约了集成光学技术在囚禁离子量子系统中的实用化进程。

创新研究

研究团队创新性地提出了一种波导集成光栅耦合方案（如图1所示）。该方案基于200 mm晶圆级工艺，将光栅结构与微加工离子阱一体制备，采用双层100 nm氮化硅作为光栅层、100 nm氧化铝作为光子路由层，并引入新型相位偏移切趾法。通过优化光栅周期与齿部曲率，实现了纵向与横向的光场汇聚；同时利用双层波导的横向偏移打破垂直对称性，显著提升了向上发射的方向性。最终，该集成光栅可覆盖2.18%的立体角，单模波导收集效率达到0.043±0.007%，成功突破了传统体块光学方案在集成性方面的限制

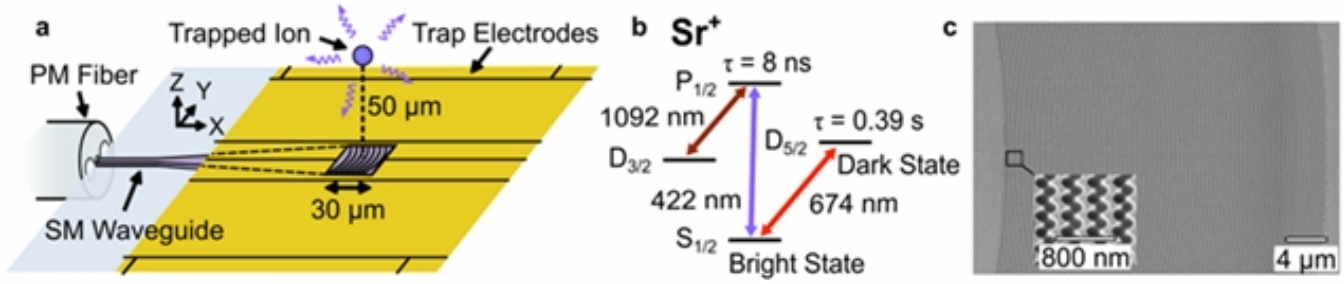


图1：聚焦衍射光栅将被困离子的荧光光子收集到单模（SM）波导中。

研究团队进一步构建了多维度光栅性能验证体系（如图2所示），结合3D FDTD模拟、高数值孔径显微镜成像与囚禁离子荧光扫描成像，精准对比理想与实际制备光栅的发射特性，量化铟锡氧化物层偏移、凹陷、光栅齿形变等缺陷对效率的影响。还通过偏振特性分析验证低串扰潜力，为工艺优化提供清晰方向。

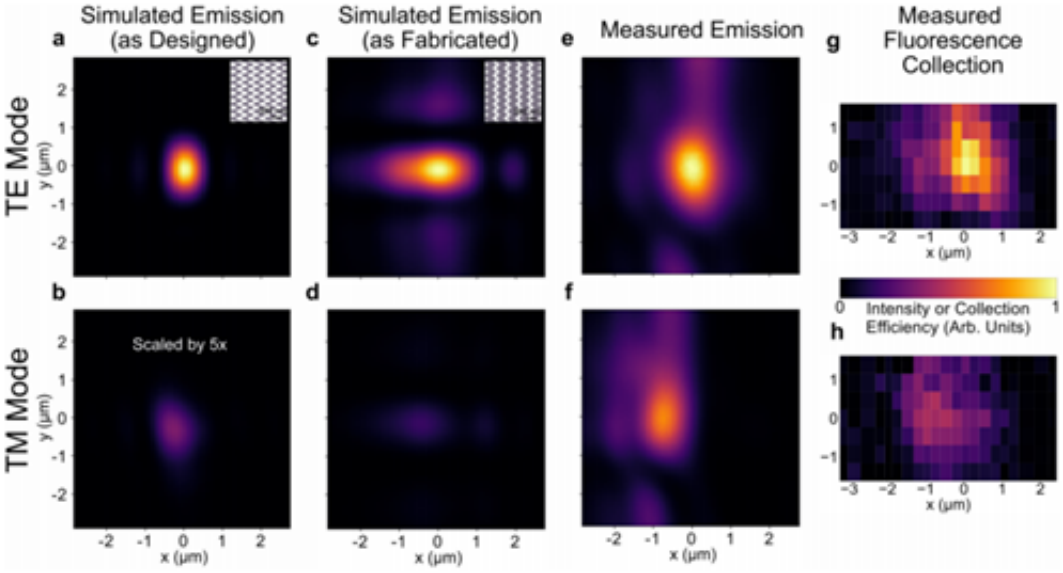


图2：光栅发射与收集的空间分布图。

研究人员还基于集成光栅实现88Sr+离子量子态高效检测（如图3所示），通过422nm共振光激发区分亮态与暗态，8ms检测时间下亮态、暗态保真度分别达90.7±0.3%与92.5±0.3%；还创新采用自适应协议，将8ms检测时间拆分为10个区间，平均2.66ms即可识别亮态，同时完成拉比振荡测量，验证该集成路径在量子态快速检测中的实用性。

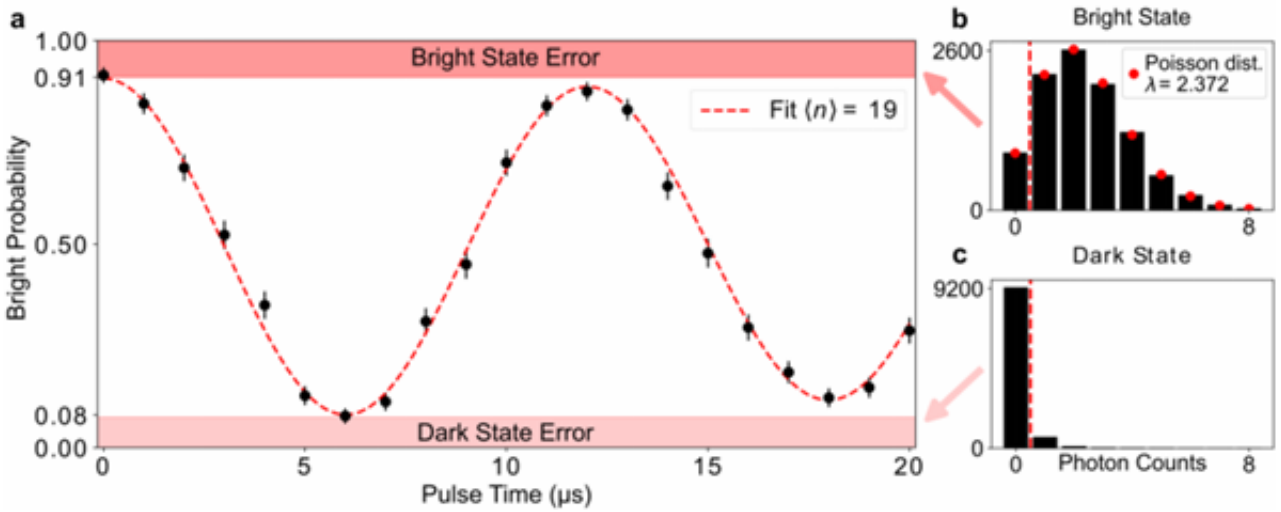


图3：通过定制衍射光栅耦合器收集荧光测量的Sr+光学量子比特拉比振荡。

总结与展望

该研究首次实现囚禁离子荧光向阱集成单模波导的高效收集，核心成果包括：提出新型相位偏移切趾光栅设计方法，通过双层波导结构与参数优化，在微加工陷阱芯片上实现光栅与离子阱的一体制造。同时通过模拟与实验量化了制备缺陷对性能的影响，验证了收集效率模型的有效性，为集成光子学在量子系统中的应用奠定基础。

未来研究可从三方面推进：一是优化制备工艺，减少氧化层凹陷、光栅齿形变等缺陷，结合单光子雪崩二极管与多模光纤，预计可将光子检测效率提升 19.5dB，实现亚350 μ s的高保真检测；二是扩大光栅尺寸并采用高分辨率光刻技术，进一步提升模式匹配效率；三是通过多光栅阵列与波导耦合探测器的集成，构建多量子发射器阵列的荧光收集与操控系统，推动规模化量子纠缠生成与分布式量子计算的实用化，助力量子信息处理技术的突破。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-02138-9

作者：John Chiaverini 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发