
MZN超材料中实现长程量子纠缠

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37552.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！

MZN超材料中实现长程量子纠缠。 导读

在量子信息处理领域，量子纠缠的产生与维持至关重要。近日，美国哈佛大学Michaël Lobet团队展示了利用介电质近零（mu-near-zero, MNZ）超材料实现长程量子纠缠的成果。研究团队提出全介电平台，结合金刚石氮空位中心芯片技术，借助MNZ超材料将纠缠范围大幅提升至17个自由空间波长（约12.5 μm），瞬态和稳态并发度较以往工作增强一个数量级。该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》上，题为Long-range quantum entanglement in dielectric mu-near-zero metamaterials，美国哈佛大学Olivia Mello为论文的第一作者，Michaël Lobet为论文的通讯作者。

研究背景

在量子信息处理与量子光学领域，量子纠缠作为量子计算、量子通信和量子计量的核心资源，其长距离维持能力始终是制约技术发展的关键瓶颈。传统固态量子系统中，量子发射体的空间退相干效应通常局限于波长尺度内，而环境耦合引发的耗散过程更使纠缠态难以在短时间内保持稳定。尽管近零折射率光子学通过延展波长提升相干长度的思路为解决长程纠缠提供了新路径，但现有研究多依赖等离子体近零波导，其固有的欧姆损耗严重限制了纠缠范围与效率。

然而，当前基于近零折射率介质的量子纠缠研究仍面临若干未解决的核心问题：一方面，尽管近零体系已实现一定程度的纠缠增强，但其金属基底导致的能量耗散难以满足芯片级量子系统的低损耗需求，如何在保持近零折射率效应的同时构建全介电平台，仍是未突破的技术难点；另一方面，现有长程纠缠方案多依赖复杂的纠缠交换协议或腔量子电动力学架构，难以直接集成于平面芯片系统，而基于MNZ超材料的纠缠调控虽展现出低损耗潜力，但其在可见光波段与量子发射体的兼容性设计，以及多体纠缠场景下的相位匹配优化问题，尚未形成系统性解决方案。这些挑战直接制约了量子信息处理从实验室原型向实用化芯片的跨越。

创新研究

研究团队首次提出全介电MNZ超材料平台用于长程量子纠缠调控，突破传统等离子体近零波导的欧姆损耗瓶颈。通过设计二维方晶格金刚石柱结构（见图1），在737 nm波长实现磁导率 μ 零跨越，构建有效折射率低至-0.03的MNZ介质，使量子发射体间的纠缠范围扩展至17个自由空间波长，较近零波导提升一个数量级。并且，该全介电设计与金刚石氮空位中心芯片技术兼容，从材料体系上解决了传统等离激元结构的能量耗散难题。

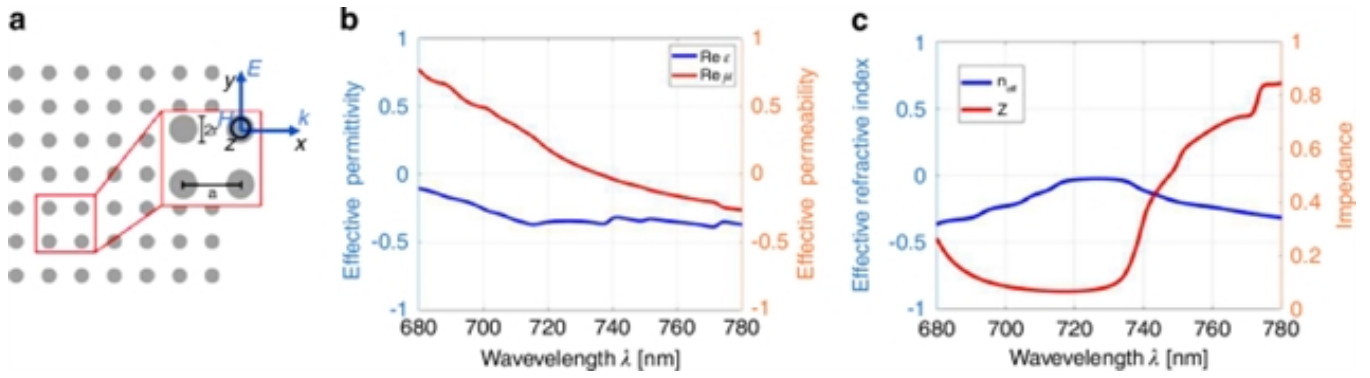


图1：二维方形超材料晶格结构及有效参数。

实验设计上，团队通过全波数值模拟优化 MNZ 结构参数，采用周期505nm、半径115 nm的金刚石柱阵列，在保持低阻抗的同时实现7倍 Purcell 因子增强。该设计巧妙利用狄拉克锥色散特性，通过调节柱子半径打破模式简并，在布里渊区点构建磁单极模式，使 Hz场的虚部（对应 $\text{Im } Z$ ）在 $12 \mu\text{m}$ 范围内保持均匀分布，为长程纠缠提供场分布基础（见图2）。这种基于能带工程的超材料设计方法，为量子光学元件的空间尺度拓展提供了新范式。

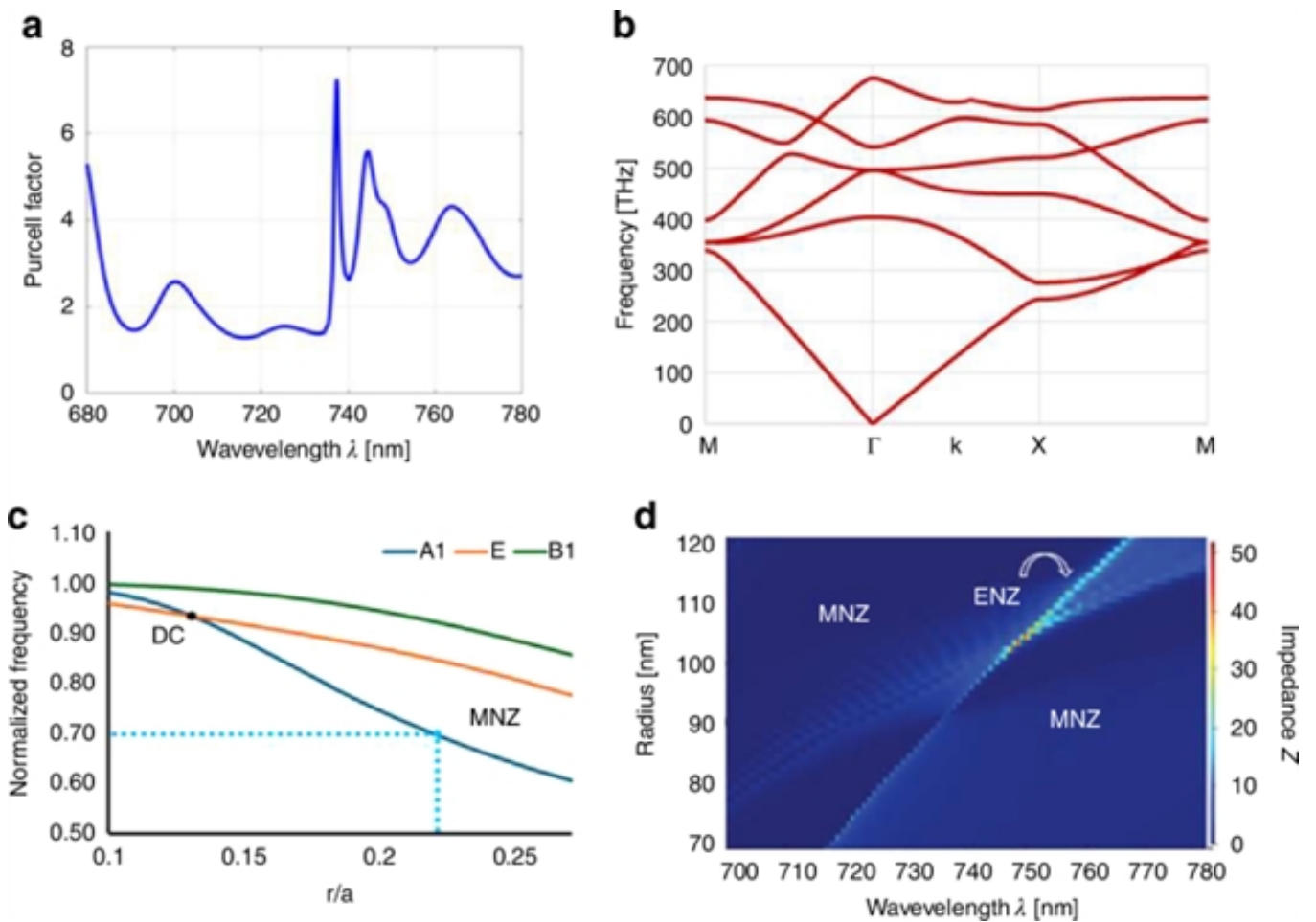


图2：MNZ 结构的珀塞尔因子光谱及能带结构（737nm 波长）。

在理论建模层面，团队创新性地将格林张量计算与 Lindblad 主方程结合，建立协同考虑自发辐射与偶极-偶极耦合的量子动力学模型。通过解析 MNZ 介质中 Hz 场的实虚部分布（如图3所示），证明了衰减率 γ_{12} 与偶极耦合强度 g_{12} 的解耦特性，实现 $\gamma_{12}/g_{12} > 3$ 的理想纠缠调控条件。该模型首次揭示 MNZ 超材料中超模式效应——即电磁模式在亚波长结构中形成类法布里-珀罗腔的全局场分布，从而突破传统近场耦合的距离限制。

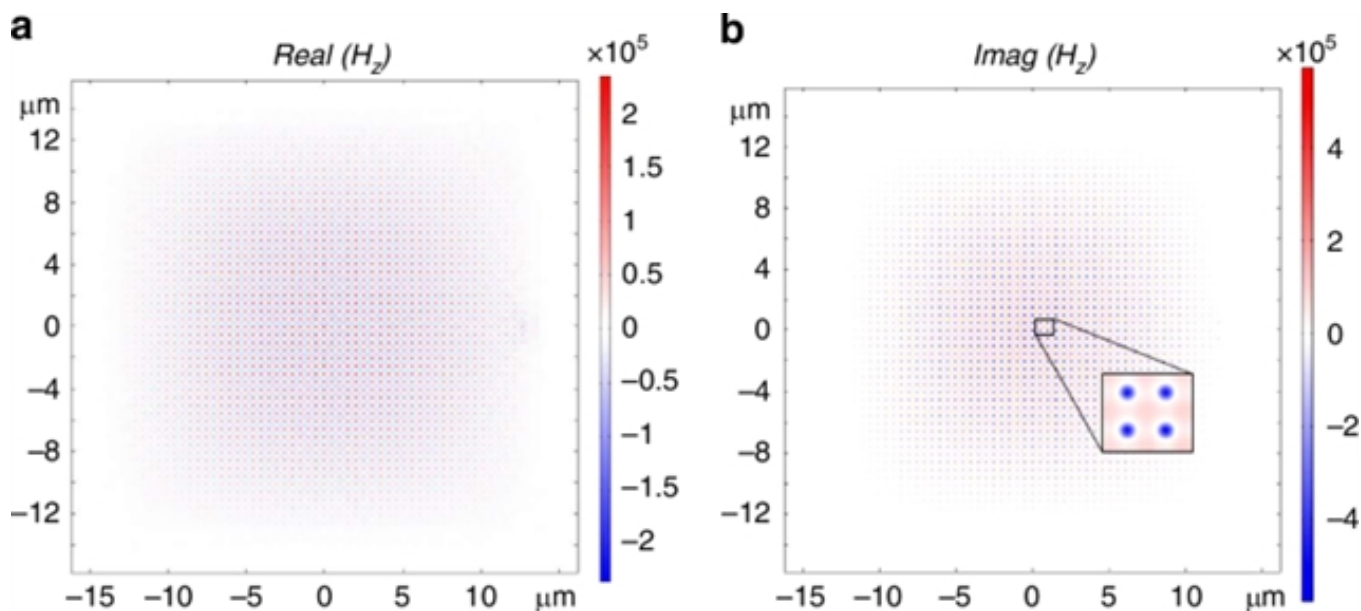


图3：MNZ单极模式下Hz场的实部与虚部分布。

功能验证方面，团队首次在 MNZ 超材料中同时实现瞬态与稳态纠缠的实验验证。通过测量零时间延迟二阶相关函数 $g_{12}(0)$ ，证实了瞬态和稳态并发度与光子反聚束的关联。利用外部泵浦实现稳态纠缠，发现最大并发度出现在反对称泵浦配置 ($\gamma_1 = -\gamma_2$)，在 15 个波长距离下仍保持 $C > 0.2$ 的纠缠度。该成果突破了传统固态系统中纠缠瞬态衰减的局限，为构建可扩展的量子纠缠网络提供了关键技术支撑。

总结与展望

本研究提出全介电 μ 近零 (MNZ) 超材料平台，通过二维方晶格金刚石柱结构实现磁导率 μ 零跨越，构建有效折射率低的介质环境，将量子发射体间的纠缠范围拓展至 17 个自由空间波长，瞬态与稳态并发度较传统等离激元体系提升一个数量级。

该技术未来可向三方面拓展：其一，推动量子中继器与分布式量子计算网络的芯片级集成，利用 MNZ 超材料的低损耗特性解决长距离纠缠的退相干难题；其二，探索多体纠缠系统中基于能带工程的相位匹配优化，如构建二维 MNZ 阵列实现多量子比特的集体调控；其三，结合金刚石薄膜制备工艺，优化材料吸收损耗与制造公差，进一步提升纠缠保真度与器件兼容性。此外，MNZ 超材料与其他量子发射体（如量子点、铟掺杂硅）的耦合机制研究，将为可见光至通信波段的全谱段量子信息处理提供新范式。（来源：LightScienceApplications 微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01994-9>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真

实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。
作者：Michael Lobet 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](http://www.iikx.com)转发