

拉曼量子存储研究进展

熊威 黄银疆 张雪莹 沈思 张子昌 敬波 魏世海 宋海智

Research progress on Raman quantum memory

XIONG Wei, HUANG Yinjiang, ZHANG Xueying, SHEN Si, ZHANG Zichang, JING Bo, WEI Shihai, SONG Haizhi

引用本文:

熊威, 黄银疆, 张雪莹, 等. 拉曼量子存储研究进展[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1207–1216. DOI: 10.5768/JAO202546.0612003

XIONG Wei, HUANG Yinjiang, ZHANG Xueying, et al. Research progress on Raman quantum memory[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1207–1216. DOI: 10.5768/JAO202546.0612003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

胶质红外量子点薄膜入射角对荧光特性的影响分析

Effect of incidence angle on fluorescence properties of colloidal infrared quantum dots thin film

应用光学. 2020, 41(5): 1082–1088 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0506003>

基于多峰高斯拟合的分布式拉曼测温系统设计与应用

Design and application of distributed Raman thermometry system based on multi-modal Gaussian fitting

应用光学. 2023, 44(1): 128–136 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103003>

OWC/RF混合通信系统研究进展

Research progress of OWC/RF hybrid communication system

应用光学. 2024, 45(2): 237–248 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0209001>

短波红外偏振成像技术的研究进展

Research progress of short-wavelength infrared polarization imaging technologies

应用光学. 2023, 44(3): 643–654 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0304003>

基于视觉的传感器位置记忆追踪方法

Memory tracking method of sensor location based on vision

应用光学. 2021, 42(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502005>

双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展

Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology

应用光学. 2021, 42(1): 157–175 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1207-10

引用格式: 熊威, 黄银疆, 张雪莹, 等. 拉曼量子存储研究进展 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1207-1216.

XIONG Wei, HUANG Yinjiang, ZHANG Xueying, et al. Research progress on Raman quantum memory[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1207-1216.



在线阅读

拉曼量子存储研究进展

熊威¹, 黄银疆¹, 张雪莹², 沈思³, 张子昌³, 敬波¹, 魏世海², 宋海智³

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川成都 611756; 2. 西华大学理学院高性能科学计算省高校重点实验室, 四川成都 610039; 3. 西南技术物理研究所, 四川成都 610041)

摘要: 量子存储器是实现光量子态存储与检索的关键器件, 在量子通信、量子计算以及量子精密测量等领域具有重要作用。目前, 量子存储器已在多种物理体系和存储协议中得到广泛验证。其中, 热原子系综体系因其可在室温条件工作、制备成本较低且具备强光-原子相互作用的天然优势, 备受关注。在众多存储协议中, 拉曼量子存储协议凭借大带宽特性以及对超短脉冲信号高效存储的能力, 非常适合高速量子信息处理, 因而成为了量子存储的研究热点。基于此, 本文回顾了热原子系综结合拉曼存储协议量子存储器的最新研究进展, 主要包括介绍量子存储器性能指标、阐述拉曼存储协议的原理和特性、综述相关理论与实验研究进展, 以及对未来研究的展望。

关键词: 量子存储; 量子信息; 拉曼存储; 热原子系综

中图分类号: TN205; O56

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0612003

Research progress on Raman quantum memory

XIONG Wei¹, HUANG Yinjiang¹, ZHANG Xueying², SHEN Si³, ZHANG Zichang³,
JING Bo¹, WEI Shihai², SONG Haizhi³

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Provincial Key Laboratory of High-Performance Scientific Computing, School of Science, Xihua University, Chengdu 610039, China; 3. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Quantum memory is a crucial device for the storage and retrieval of photonic quantum states, serving as a cornerstone for quantum communication, quantum computing, and quantum metrology. Significant progress has been achieved in various physical systems and storage protocols. Among these, warm atomic ensembles have garnered considerable attention due to their inherent advantages, including room-temperature operation, low preparation cost, and strong light-atom interactions. Raman quantum memory protocol stands out for its suitability in high-speed quantum information processing, offering broad bandwidth and effective storage of ultrashort pulses. This review focuses on recent progresses in quantum memory based on warm atomic ensembles employing Raman protocol. We introduced key performance metrics of quantum memory, elaborated on the principles and characteristics of the Raman protocol, and summarized the latest theoretical and experimental advancements, as well as discussed the future research prospects.

Key words: quantum memory; quantum information; Raman memory; warm atomic ensemble

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 (92365112)

第一作者: 熊威, E-mail: xiongwei323@my.swjtu.edu.cn

通信作者: 魏世海, E-mail: shwei@xhu.edu.cn

引言

量子信息技术利用量子叠加、量子纠缠等特性,展现出了超越经典技术的运算能力和通信安全性。量子网络作为量子信息技术最重要的研究方向,正推动通信、计算以及测量等多个领域的变革。光子因其传播速度快、抗干扰能力强以及信息容量大等特点,被广泛用作量子信息的载体^[1]。然而,光子在传输过程中因吸收和散射导致损耗随距离呈指数增长,且受不确定性原理和不可克隆定理限制^[2],无法借助传统光放大技术手段进行补偿^[3-4],因此导致光子直接传输距离受限。这一限制促使了量子中继技术的应运而生^[5-9]。其核心在于通过在中继节点部署高性能量子存储器,暂存并按需释放飞行量子比特,实现远距离纠缠交换与信息同步,为构建大规模量子网络提供了可行路径。因此,构建长距离量子网络的关键之一是实现高性能的量子存储器。

量子存储器的制备主要涉及两个核心方面:存储方案与存储介质。存储介质是用于实现光子存储的物理平台,主要包括单粒子体系和原子系综体系。相较于单粒子体系,原子系综体系更易实现高效的光-原子相互作用,从而提升存储效率。原子系综体系包含了冷原子、热原子及固态体系。相较于冷原子及固态体系,热原子体系无需低温或真空环境等额外条件,且制作成本较低,可直接采用简易的原子气体玻璃气室。此外,热原子系综还可以充入空心光纤^[10]、微机电系统^[11]、片上波导^[12]、激光写入系统^[13]等微型化、集成化器件,制备小型化、集成化的量子存储器件,有助于大尺度量子网络的构建。量子存储方案决定量子存储器的工作原理,主要包括电磁感应透明(electromagnetically induced transparency, EIT)方案^[14-15]、光子回波方案^[16-17]、远失谐拉曼量子存储方案^[18]以及 DLCZ(Duan-Lukin-Cirac-Zoller)量子存储方案^[19-20]。远失谐拉曼量子存储通过远失谐拉曼跃迁过程实现光信号的存储与读取,相较于其他量子存储方案,具有更大的存储带宽(GHz 量级),可直接与高带宽光子源对接,适用于高速量子信息处理。

1 量子存储指标

量子存储器的性能评估指标主要包括:存储效率、存储寿命、存储保真度、存储带宽及工作波长

等。下文将分别阐述这些指标在量子存储中的定义。

1.1 存储效率

存储效率是量子存储至关重要的性能指标,对于吸收型量子存储来说,通常定义为检索出的光子数与输入光子数的比值,即单个光子经过存储后可被检索到的概率。对于吸收型量子存储(如 DLCZ),存储效率定义为在检测到读出光子的条件下,能够探测到读出光子的概率。存储效率主要取决于光-物质的相互作用强度。原子系综因具有集体增强效应,光-物质相互作用强度更强,因此基于原子系综的存储方案具有较高的存储效率。此外,提高介质的光学厚度可增强光-物质相互作用;优化泵浦激光脉冲形状及功率亦可提升量子存储器的存储效率。目前,WU Z L 等人开发了基于切比雪夫采样的改进差分进化算法,实现了信号-控制波形的完美匹配,单模高斯信号的存储效率高达 92%^[21]。

1.2 存储时间和存储寿命

存储时间是指量子态从存入量子存储器至读出之间的间隔时长。受存储介质中的退相干效应的影响,存储效率会随存储时间延长而降低,存储寿命通常定义为存储效率衰减至初始值的 $1/e$ 时所对应的存储时间。存储寿命不仅直接影响量子存储器的缓存能力,也决定了系统在同步飞行量子比特时的性能。将长寿命量子存储器部署于量子中继节点,可显著扩展量子态传输的距离。对于基于热原子系综的量子存储器,存储寿命主要受原子热运动影响;对于冷原子体系及固态体系,由于引入了极低温实验条件,原子的热运动影响可忽略不计,但实用化也受到了限制。目前,固态体系中实现的最长存储时间为 1 h^[22],在冷原子体系为 1 min^[23]。

1.3 存储保真度

存储保真度定义为量子态存储前后的相似性度量。对于存储状态为 ρ_i 、输出状态为 ρ_o 的量子存储器,其保真度可由公式 $F = \left(\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\rho_o} \rho_i \sqrt{\rho_o}} \right)^2$ 计算得到。保真度是衡量存储过程是否保持量子叠加或纠缠等本征量子特性的关键指标。理想情况下,量子存储器的保真度为 1。在实际应用中,量子存储器需满足特定阈值才能确保其真正发挥量子优势。例如,对于量子信息编码在单个量子比特中,阈值要求为 $2/3$ ^[24]。截至目前,各种存储介

质中都实现了超过 99% 的存储保真度^[25-26]。

1.4 存储带宽

量子存储器的存储带宽是指其能够完整存储单个光子波包的最大光谱宽度。基于原子系统体系结合远失谐拉曼存储方案可获得较大的存储带宽,上限取决于基态能级间的间隔。此外,基于稀土离子掺杂晶体的固态量子存储器因具有较大的非均匀展宽,同样展现出了大带宽特性。大带宽量子存储器可更快地存储光子波包或支持更多频率复用模式,这对实现高速量子信息处理具有重要意义。

1.5 工作波长

工作波长指量子存储器能够有效存储并保持光子量子态的波长,通常由所用的存储介质决定。对于量子中继网络的实用化构建,要求飞行量子比特的工作波长应位于通信波段,以兼容现有光纤通信基础设施。然而不同的物理体系具有不同的工作波长,对于本身具有通信波段共振特性的存储介质,如掺铒固态系统,可直接实现通信波段光子的存储与读取。对于工作波长与通信波段不匹配的物理平台,则可借助光学频率转换技术,将存储后读出的非通信波段的光子转化为通信波段光子再进行远距离传输。

2 拉曼量子存储研究进展

2.1 拉曼存储协议

拉曼存储协议是一种基于原子系统的光子存储方案,它通过远失谐双光子共振跃迁过程实现光子信号的存储与读取。该方案采用三能级 Λ 型能级结构(如图 1 所示),与 EIT 相比,尽管在存储机理上都是采用双光子跃迁实现存储,但拉曼存储协议的信号光子、写入/读取脉冲与原子激发态都是大失谐,信号光子不再被激发态直接吸收。具体地,拉曼量子存储主要包括写入和读出两个阶段。写入阶段:信号光和失谐量为 Δ 写入脉冲共同作用,诱导原子从基态 $|g\rangle$ 跃迁到另一个稳定的基态 $|s\rangle$,即实现光信号的存储。在这一过程中,信号光和写入光须满足双光子共振的条件。读取阶段:施加的读取脉冲光与原子系统相互作用,诱导原子从被存储的基态 $|s\rangle$ 发生逆向拉曼跃迁,回到初始的基态 $|g\rangle$,实现光信号的读出。此外,强控制场(写入/读取脉冲)通过动态缀饰原子能级可产生宽虚拟能级,使信号光子的耦合带宽突破原子自

然能级线宽的限制。因此,拉曼存储协议具备实现大带宽光子存储的能力,适用于高速量子信息处理。值得注意的是,控制/读出场的失谐量远大于多普勒展宽,可避免原子热运动导致的非均匀展宽影响,因此拉曼存储协议支持在室温条件下实现量子存储,这大大降低了量子存储的实验难度。

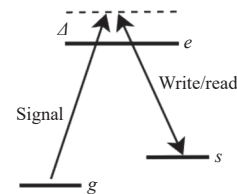


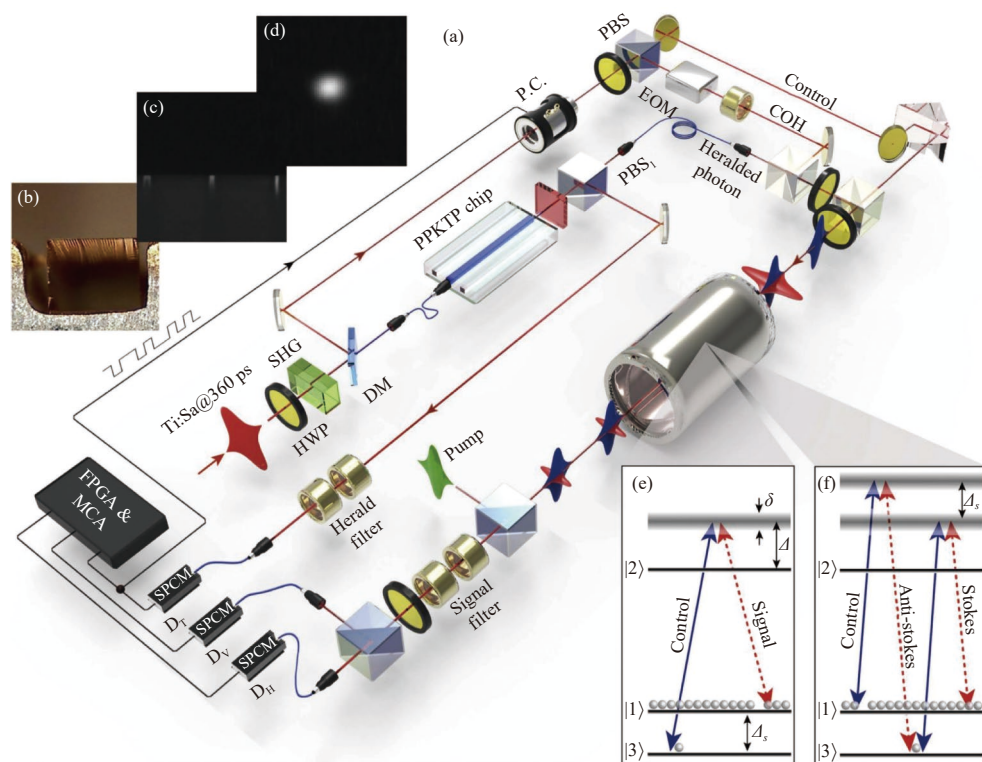
图 1 拉曼存储协议能级图

Fig. 1 Energy level diagram for Raman protocol

2.2 研究进展

远失谐拉曼量子存储因可在室温条件下实现大带宽、长寿命的量子存储备受关注。2010 年,英国牛津大学 REIM K F 等人首次在铯原子蒸气池中演示了带宽超过 1 GHz 的光脉冲存储实验^[18]。随后,该研究组通过噪声抑制策略,进一步实现了单光子水平的量子存储,并将存储寿命提升两个数量级至微秒量级,验证了室温拉曼量子存储器的可行性^[27]。2015 年,MICHELBERGER P S 等人在室温下首次实现 GHz 带宽预报式单光子与拉曼存储器的对接,构建了适用于时间多路复用的存储器件(如图 2 所示)^[28]。尽管该存储器在带宽和多路复用性能方面取得显著进展,但其存储效率与寿命仍因四波混频噪声的限制而有待提升。基于原子系统的室温量子存储器性能不可避免地受到原子热运动影响,尽管热运动对基态超精细相干性的寿命影响有限,但其对量子态存储的相干性和保真度具有显著负面作用^[29]。为了减弱上述负面作用,一种有效的方法是在原子池内壁镀上抗弛豫膜层,缓解原子与池壁碰撞引发的退相干影响。例如,碱金属原子在内壁镀有石蜡的原子池中可支持 10^4 次原子与池壁碰撞^[30],而采用基于烯炔材料新型涂层的原子池则可支持 10^6 次碰撞^[31]。此外,引入运动平均原理能够在一定程度上补偿因原子热运动导致的粒子逸出效应,从而进一步延长量子存储器的有效寿命和提高整体性能^[32]。

存储效率是评估量子存储器性能的核心指标。如前文所述,可通过增加光学厚度或优化脉冲形状进一步提升。GORSHKOV A V 等人通过理论分析表明量子存储器可实现的存储效率上



(a) 实验装置; (b) PPKTP 波导芯片的输入面; (c) 宽度为 $4\ \mu\text{m}$ – $2\ \mu\text{m}$ 的波导(从左至右); (d) EM-CCD 图像显示了实验中使用的 $3\ \mu\text{m}$ 波导产生的 SPDC 光子的空间模式; (e) 拉曼存储方案; (f) 四波混频噪声

图2 GHz 带宽的预示单光子和拉曼存储器的接口连接^[28]

Fig. 2 Interfacing GHz-bandwidth heralded single photons with a Raman memory^[28]

限取决于存储介质的光学厚度,而脉冲形状的优化是达到这个上限的必要手段^[33]。2008年,PHILLIPS N B 等人提出了两种脉冲形状优化方案:基于时间反演迭代确定给定控制场下的最优信号脉冲形状,以及基于给定信号脉冲形状计算最优控制场^[34]。2019年,华东师范大学 GUO J 等人为解决远失谐拉曼量子存储器的低效率瓶颈,通过开发脉冲形状最优控制技术,在热原子系综中实现了弱相干光存储,存储效率高达 82.6%^[35]。图 3(a) 为原子能级结构示意图,原子在泵浦光作用下被制备至初态 $|m\rangle$,随后输入的信号脉冲 (E_{in}) 经强非共振写入脉冲 (W) 诱导,以失谐量 Δ_W 转化为原子自旋激发态并存储在状态 $|g\rangle$ 。经过特定延迟 τ 后,强非共振读取脉冲 (R) 以失谐量 Δ_R 将原子激发态反演为光场态 E_R 并读出; E_{leak} 为穿过原子池后未被存储的信号光。图 3(b) 为实验装置图,OP 为泵浦光,强写入/读取脉冲耦合至同一单模光纤 (SMF),经格兰偏振器 (Glan) 后与弱信号脉冲共线进入原子池。原子池后的格兰偏振器用于分离控制光脉冲,通过翻转反射镜 FM1、FM2 实现强度检测、零差检测、单光子检测的灵活切

换。实验中采用的优化控制技术核心是通过实时调控写入脉冲参数(时间波形、相位等),使原子与输入信号 E_{in} 的相干相互作用最大化,促使输入信号尽可能转化为自旋波,而非噪声或泄露光子。基本优化逻辑为通过迭代算法模拟不同写入波形下的自旋波和泄露信号光子,筛选出使泄露的信号光子最少、自旋波最大的写入脉冲时间形状。此外,在时间波形优化基础上,还引入相位调制以抑制自发噪声,并增强原子与输入信号的相干作用。尽管已实现高性能拉曼存储器,但其带宽受限于现有调制器(调制最短时间为 6 ns)。若更换性能更好的调制器可进一步提升存储带宽。除传统通过增强光-物质相互作用强度提高存储效率的方法外,2024 年 BURDEKIN P M 等人提出一种名为光-物质干涉提高效率 (efficiency enhancement via light-matter interference, EEVI) 的新方法^[36]。EEVI 的核心原理是:将存储器视为类似马赫-曾德尔干涉仪的分步结构,利用光场与自旋波的量子干涉提升存储器效率。与传统通过增强光-物质相互作用强度(如强控制场、光学腔)的思路不同,EEVI 方法可避免带宽损失和噪声增加,且适

用于共振/非共振能级结构。但该方案的存储效率受限于回路传输效率(63.5%),且高存储效率下自旋波聚集及高控制场引发的非线性效应(如自散焦)会降低总效率。此外,亦有研究组将分子缓

冲气体的碰撞淬灭技术应用于远失谐拉曼存储器,同时实现了超高光学厚度(2×10^5)和近完美自旋极化度($> 99.5\%$),从而提升了拉曼存储器的效率与增益可控性^[37]。

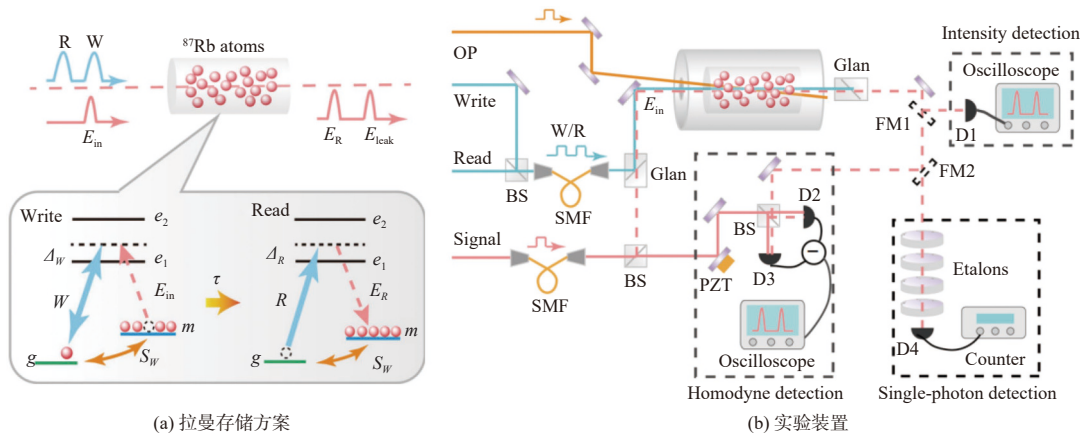


图3 室温原子中高效率拉曼量子存储器^[35]

Fig. 3 High-efficiency Raman quantum memory in room-temperature atoms^[35]

在基于室温原子系综的量子存储方案中,碰撞荧光噪声和量子态退相干是影响其性能的主要因素。拉曼存储协议凭借大失谐特性,能够有效抑制碰撞荧光噪声。然而,对于采用 Λ 型能级结构的拉曼量子存储器,通常需要强控制光将信号光子耦合至原子系综,这一过程不可避免地通过非线性机制诱发严重的四波混频(four-wave mixing, FWM)噪声^[38-39],显著降低室温量子存储器的信噪比及保真度。抑制FWM噪声的有效途径是增强光-物质相互作用,以降低所需控制光的强度。2014年,SPRAGUE M R等人在填充铯原子的kagome结构空芯光纤中利用光诱导原子解离的方法使得吸附在光纤壁上的原子进入空芯区域,将光学厚度提升了一个数量级(达数千),从而显著增强光-物质相互作用^[10]。在此基础上,该研究在室温下实现了单光子水平信噪比为2.6,且所需控制脉冲能量仅40 pJ,比自由空间系统降低了200倍。然而,由于光泵浦光束通过耦合存储态和激发态破坏了自旋相干性,导致存储器存储寿命仅为27 ns,远低于预期的100 ns。另一种抑制FWM噪声的思路是利用光学谐振腔增强光-物质相互作用,即能够有效降低控制脉冲能量并同时抑制反斯托克斯散射。2016年,SAUNDERS D J等人在拉曼量子存储器中引入低精细度双折射环形腔,使信号场(斯托克斯场)与控制场同时共振,从而增强拉曼相互作用^[40]。该方法使控制脉冲能量需求降低了约10倍,进一

步提高腔精细度可继续降低能量需求。此外,通过设计反斯托克斯场的反共振条件,利用破坏性干涉抑制FWM噪声,他们在实验上实现了无条件本底噪声为 $(15 \pm 2) \times 10^{-3}$ 光子/脉冲、存储效率为9.5%的室温拉曼量子存储器。为了实现无需复杂光腔即可抑制FWM噪声,THOMAS S E等人提出内置噪声抑制(built-in noise suppression, BNS)^[41]方案。该方案噪声抑制机制是利用特定失谐,促使FWM噪声场与信号场跃迁共振,并利用原子系综的强线性吸收特性吸收噪声;与此同时,FWM噪声的生成及吸收过程形成相消干涉,从而抑制反斯托克斯散射并降低对信号场的影响。该方案将噪声光子数从标准方案的0.793降至0.046 7,实现了17倍的抑制。虽然BNS拉曼存储方案延长了存储寿命,但其存储效率略低于标准拉曼存储方案。2023年,YU Z等人针对“效率提升必伴随噪声增长”的固有矛盾,提出了一种集成量子干涉测量的双程拉曼量子存储器^[42]。具体地,光场先正向通过原子池,再经反射反向传输,并在反向驱动场上通过压电陶瓷施加相位偏移。当施加的相位偏移为 π 且正向和反向耦合系数相等时,斯托克斯及反斯托克斯噪声便会通过破坏性干涉相互抵消至真空水平。该方案实现了约80%的噪声抑制,信噪比提升了7倍。在单光子水平下,保真度达到了93.7%,显著超过不可克隆极限。这是首次在量子存储器中集成量子干涉,进而同时实现噪声抑

制与效率提升。然而,由于存在约 20% 的光程损耗,其干涉可见度和噪声抑制效率仅能达到 80%。

为了从原理上抑制 FWM 噪声,英国牛津大学 KACZMAREK K T 等人开展了基于梯形能级结构的拉曼量子存储研究。2018 年,该团队采用双光子非共振级联吸收 (off-resonant cascaded absorption, ORCA) 协议,首次在室温原子蒸气中实现了 GHz 量级带宽的无噪声单光子存储^[43]。如图 4 所示,梯形级联结构能够有效避免存储态被散射过程所填充,从而在物理机制上消除 FWM 噪声。此外,该结构中强控制光仅耦合第一激发态与存储态,而不与基态发生相互作用,因此不会像 Λ 型能级结构方案那样引入大量荧光噪声。ORCA 协议的原理如图 4(a) 所示,弱信号脉冲与强写入脉冲在原子池中沿共线方向反向传播。存储过程中,信号光子被映射为基态 $|g\rangle$ 与存储态 $|s\rangle$ 之间的集体

原子相干态。经过存储后,通过施加读取脉冲,将集体原子相干性重新映射为光场,并以正向方式读出。ORCA 量子存储器在室温条件下具有高带宽、低噪声特性,能够直接应用于低延迟量子网络。该技术有望用于同步概率型量子光源,提高光量子态的产生速率,并且与集成网络架构也具有良好的兼容性。然而,由于在梯形能级结构中信号光子存储于激发态,其存储寿命受限于短寿命的激发态。例如, KACZMAREK K T 等人在 2018 年实现的基于梯形能级结构的量子存储器仅能实现大约 5.4 ns 的存储寿命^[43],因此在实现长时间量子存储方面仍存在挑战。而 Λ 型能级结构方案中信号光子存储在稳定的基态,通常可以实现较长的存储寿命,例如,例如,2011 年 REIM K F 等人就已经实现了存储寿命高达 1.5 μs 的室温拉曼存储^[27]。

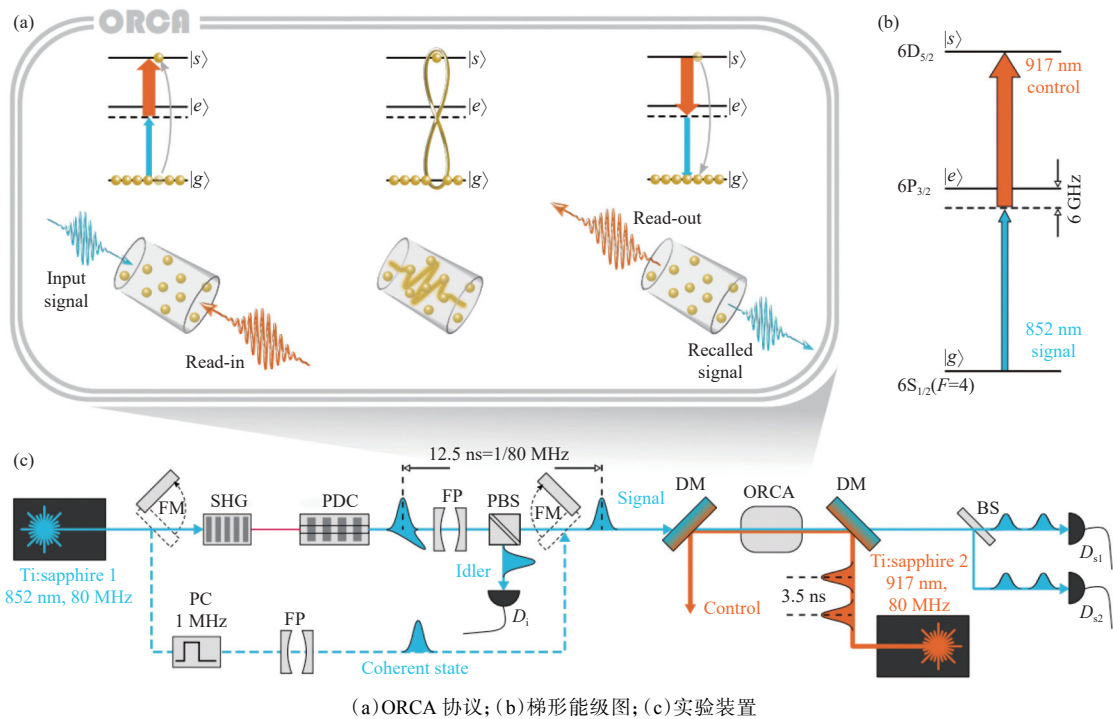


图 4 高速、无噪声光量子存储器^[43]

Fig. 4 High-speed, noise-free optical quantum memory^[43]

为延长基于梯形能级结构方案室温条量子存储器的存储时间, MAIN D 等人提出了速度选择性光泵浦方案^[44]。该方案通过有效减小室温下原子系综的速度分布,从根本上抑制由原子热运动引发的多普勒相移(即运动诱导退相干),从而延长量子存储器的存储寿命。图 5 为速度选择性泵浦原理示意图,方案分为全泵浦阶段与速度选择泵回

阶段。全泵浦阶段的目标是清空基态以消除热平衡下的宽速度分布。如图 5(a) 所示,首先采用宽带激光将基态 $|g\rangle$ 上的各速度类原子激发至辅助激发态 $|e1\rangle$,随后经自发衰变转移至长寿命辅助态 $|aux\rangle$ 。速度选择泵回阶段则用于窄化原子的有效速度分布。如图 5(b) 所示,采用线宽为 MHz 量级的窄带激光,仅将特定速度类原子从辅助态 $|aux\rangle$ 泵回至

基态 $|g\rangle$,从而仅让该速度窗口内的原子参与存储过程,达到压窄有效速度分布的目的。该技术首次在室温铯蒸气中显著延长了量子存储器的存储时间,尤其适用于光通信波段的跃迁(如铯 1 470 nm,增强因子 8.3; 铷 1 528 nm,增强因子 13.5),为构建与光通信波段光子接口兼容的长寿命量子存储器提供了有力途径,从而推动大规模量子网络的发展。

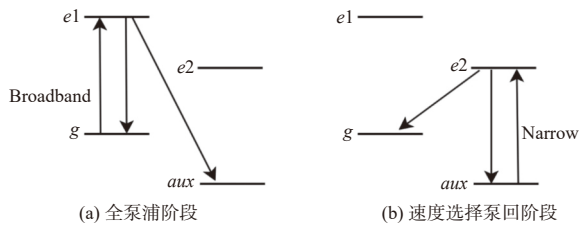
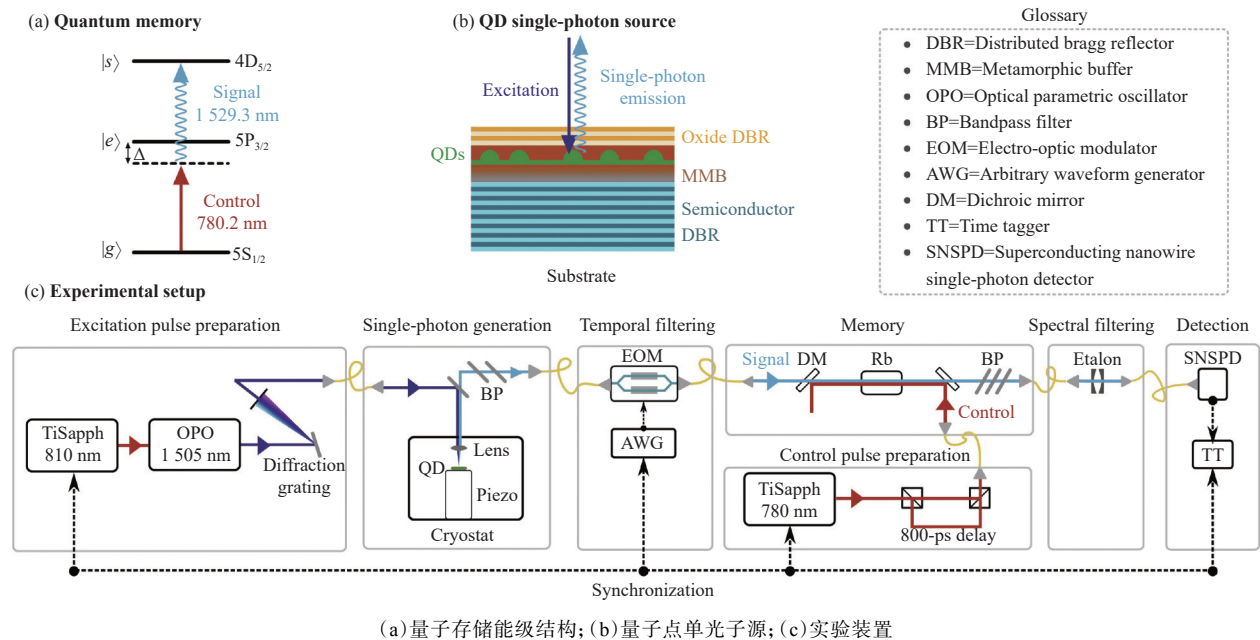


图 5 速度选择性泵浦原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of velocity-selective pumping

在此方向上,2023年,THOMAS S E等人首次将 ORCA 协议扩展至通信波段光存储领域,研制出了与光通信波段兼容量子存储器^[45]。尽管该存

储器已消除 SFWM 噪声影响并具备优异的噪声性能,但其存储时间受多普勒诱导退相干限制,仅为 1.1 ns,目前难以满足对长存储时间的应用需求。THOMAS S E 等人于 2024 年实现了通信波段的量子点单光子源与原子量子存储器的确定性存储和按需读出,构建了混合光-原子界面(实验装置如图 6)^[46]。实验中,通过量子点结构设计及信号整形,实现了与 ORCA 存储器的波长(1 529.3 nm)及模式匹配。然而,该存储器的存储时间同样受多普勒展宽限制,约为 1 ns。针对 ORCA 存储器存储寿命受多普勒展宽限制的问题,速度选择性光泵浦技术原则上虽可延长存储时间,但代价是牺牲大量原子参与度,导致存储效率降低。为此,一种更具前景的方法是 FINKELSTEIN R 等人提出的消除集体量子态非均匀退相方案^[47]。具体地,利用非共振场经由辅助态对集体态进行持续动力学缀饰,从而实现退相的实时抑制,其中辅助态对多普勒频移表现出增强且相反的敏感性。



(a)量子存储能级结构;(b)量子点单光子源;(c)实验装置

图 6 通信波段拉曼存储器^[46]

Fig. 6 Raman memory in the communication band^[46]

3 总结与展望

本文以量子信息技术相较于传统信息技术所具备的显著优势为切入点,围绕量子存储器在量子网络中构建的核心作用,论证了研发高性能量子存储器的重要性。其中,拉曼存储协议因其能够存储大带宽信号光子,相较于其他存储协议更契合高速量子信息处理的需求;尤其是基于室温

原子系综的拉曼存储方案,凭借无需复杂低温实验条件、制备成本低及实验实现简单等优点,已成为当前量子信息处理领域的研究热点。拉曼存储器的发展至今已逾十年,在存储效率、存储寿命以及带宽等关键性能指标上已取得一系列重要成果(如表 1 所示)。

尽管如此,现有室温拉曼量子存储器仍存在诸

表 1 具有代表性的拉曼量子存储器及其重要参数

Table 1 Representative Raman quantum memory and their key parameters

No.	Representative work	Storage efficiency	Storage time	Working wavelength	Bandwidth	Signal photons
1	Nature Photonics 2010, 4(4): 218-221	15%	12.5 ns	852 nm	~GHz	Weakly coherent light
2	Physical Review Letters 2011, 107(5): 053603	>30%	4 μ s	852 nm	1.5 GHz	Weakly coherent light
3	Physical Review Letters 2016, 116(9): 090501	9.5%	95 ns	852 nm	1.2 GHz	Weakly coherent light
4	Physical Review A 2018, 97(4): 042316.	14.6%	5.4 ns	852 nm	~GHz	Single photon
5	Nature communications 2019, 10(1): 148.	82.6%	1.1 μ s	795 nm	~MHz	Weakly coherent light
6	Physical Review Letters 2023, 131(15): 150804	77%	1 μ s	795 nm	100 MHz	Weakly coherent light
7	Science Advances, 2024, 10(15): eadi7346.	12.9%	1 ns	1 529.3 nm	1 GHz	Single photon

多不足,难以同时满足高效率、长寿命及高保真度等指标。尤其是在单光子存储场景中,这些性能指标的降低会更为显著。针对上述问题,拉曼量子存储可通过以下方面进一步提升。一是通过优化控制脉冲时域与频谱特性提升存储效率,并可结合光-物质干涉进一步增强器性能;二是采用特殊结构(如空芯光子晶体光纤)、光学谐振腔或集成量子干涉技术以及形能级结构抑制 FWM 噪声;三是引入速度选择性光泵浦技术或实时抑制退相方案,可有效延长存储寿命。未来的研究需持续以热原子系综为核心平台,结合其在带宽方面的固有优势,通过器件结构设计(如微型化片上集成)和协议创新(如多能级调控)等实现性能协同优化,推动拉曼量子存储器向实用化迈进,为高速量子网络的构建提供关键技术支持。

参考文献:

- [1] WALMSLEY I A. Quantum optics: science and technology in a new light[J]. *Science*, 2015, 348(6234): 525-530.
- [2] WOOTTERS W K, ZUREK W H. A single quantum cannot be cloned[J]. *Nature*, 1982, 299(5886): 802-803.
- [3] GISIN N, THEW R. Quantum communication[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(3): 165-171.
- [4] JIN X M, REN J G, YANG B, et al. Experimental free-space quantum teleportation[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(6): 376-381.
- [5] SIMON C, DE RIEDMATTEN H, AFZELIUS M, et al. Quantum repeaters with photon pair sources and multimode memories[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(19): 190503.
- [6] SANGOUARD N, SIMON C, DE RIEDMATTEN H, et al. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, 83(1): 33-80.
- [7] LAURITZEN B, MINÁŘ J, DE RIEDMATTEN H, et al. Telecommunication-wavelength solid-state memory at the single photon level[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(8): 080502.
- [8] CHOU C W, LAURAT J, DENG H, et al. Functional quantum nodes for entanglement distribution over scalable quantum networks[J]. *Science*, 2007, 316(5829): 1316-1320.
- [9] AZUMA K, TAMAKI K, LO H K. All-photonic quantum repeaters[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-7.
- [10] SPRAGUE M R, MICHELBERGER P S, CHAMPION T F M, et al. Broadband single-photon-level memory in a hollow-core photonic crystal fibre[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 287-291.
- [11] ZHU J, ZHAO R, LI Z, et al. Development of a cesium vapor MEMS cell for differential measurement of microwave electromagnetically induced transparency[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 44(1): 132-135.
- [12] RITTER R, GRUHLER N, DOBBERTIN H, et al. Coupling thermal atomic vapor to slot waveguides[J]. *Physical Review X*, 2018, 8(2): 021032.
- [13] LUCIVERO V G, ZANONI A, CORRIELLI G, et al. Laser-written vapor cells for chip-scale atomic sensing and spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 27149-27163.
- [14] MOHAPATRA A K, JACKSON T R, ADAMS C S. Coherent optical detection of highly excited rydberg states using electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(11): 113003.
- [15] PHILLIPS N B, GORSHKOV A V, NOVIKOVA I. Light storage in an optically thick atomic ensemble under conditions of electromagnetically induced transparency and

- four-wave mixing[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(6): 063823.
- [16] MOISEEV S A, KRÖLL S. Complete reconstruction of the quantum state of a single-photon wave packet absorbed by a Doppler-broadened transition[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(17): 173601.
- [17] DE RIEDMATTEN H, AFZELIUS M, STAUDT M U, et al. A solid-state light-matter interface at the single-photon level[J]. *Nature*, 2008, 456(7223): 773-777.
- [18] REIM K F, NUNN J, LORENZ V O, et al. Towards high-speed optical quantum memories[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 218-221.
- [19] DUAN L M, LUKIN M D, CIRAC J I, et al. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics[J]. *Nature*, 2001, 414(6862): 413-418.
- [20] KUZMICH A, BOWEN W P, BOOZER A D, et al. Generation of nonclassical photon pairs for scalable quantum communication with atomic ensembles[J]. *Nature*, 2003, 423(6941): 731-734.
- [21] WU Z L, GUO J, YU Z, et al. AI-assisted hyper-dimensional broadband quantum memory with efficiency above 90% in warm atoms[J]. *npj Quantum Information*, 2025, 11(1): 136.
- [22] MA Y, MA Y Z, ZHOU Z Q, et al. One-hour coherent optical storage in an atomic frequency comb memory[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2381.
- [23] HEINZE G, HUBRICH C, HALFMANN T. Stopped light and image storage by electromagnetically induced transparency up to the regime of one minute[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(3): 033601.
- [24] BUSSIERES F, SANGOUARD N, AFZELIUS M, et al. Prospective applications of optical quantum memories[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(18): 1519-1537.
- [25] ZHU T X, LIU C, JIN M, et al. On-demand integrated quantum memory for polarization qubits[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(18): 180501.
- [26] VERNAZ-GRIS P, HUANG K, CAO M, et al. Highly-efficient quantum memory for polarization qubits in a spatially-multiplexed cold atomic ensemble[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 363.
- [27] REIM K F, MICHELBERGER P, LEE K C, et al. Single-photon-level quantum memory at room temperature[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(5): 053603.
- [28] MICHELBERGER P S, CHAMPION T F M, SPRAGUE M R, et al. Interfacing GHz-bandwidth heralded single photons with a warm vapour Raman memory[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(4): 043006.
- [29] MANZ S, FERNHOLZ T, SCHMIEDMAYER J, et al. Collisional decoherence during writing and reading quantum states[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(4): 040101.
- [30] BOUCHIAT M A, BROSSEL J. Relaxation of optically pumped Rb atoms on paraffin-coated walls[J]. *Physical Review*, 1966, 147(1): 41.
- [31] BALABAS M V, KARAUANOV T, LEDBETTER M P, et al. Polarized alkali-metal vapor with minute-long transverse spin-relaxation time[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(7): 070801.
- [32] ZUGENMAIER M, DIDERIKSEN K B, SØRENSEN A S, et al. Long-lived non-classical correlations towards quantum communication at room temperature[J]. *Communications Physics*, 2018, 1(1): 76.
- [33] GORSHKOV A V, ANDRÉ A, FLEISCHHAUER M, et al. Universal approach to optimal photon storage in atomic media[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(12): 123601.
- [34] PHILLIPS N B, GORSHKOV A V, NOVIKOVA I. Optimal light storage in atomic vapor[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(2): 023801.
- [35] GUO J, FENG X, YANG P, et al. High-performance Raman quantum memory with optimal control in room temperature atoms[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 148.
- [36] BURDEKIN P M, WENNIGER I M B, SAGONASTOPHEL S, et al. Enhancing quantum memories with light-matter interference[J]. [2025-08-10]. <https://arxiv.org/pdf/2411.17365>.
- [37] THOMAS S E, MUNNS J H D, KACZMAREK K T, et al. High efficiency Raman memory by suppressing radiation trapping[J]. *New Journal of Physics*, 2017, 19(6): 063034.
- [38] VURGAFTMAN I, BASHKANSKY M. Suppressing four-wave mixing in warm-atomic-vapor quantum memory[J]. *Physical Review A*, 2013, 87(6): 063836.
- [39] ZHANG K, GUO J, CHEN L Q, et al. Suppression of the four-wave-mixing background noise in a quantum memory retrieval process by channel blocking[J]. *Physical Review Applied*, 2014, 90(3): 033823.
- [40] SAUNDERS D J, MUNNS J H D, CHAMPION T F M, et al. Cavity-enhanced room-temperature broadband Raman

- memory[J]. [Physical Review Letters](#), 2016, 116(9): 090501.
- [41] THOMAS S E, HIRD T M, MUNNS J H D, et al. Raman quantum memory with built-in suppression of four-wave-mixing noise[J]. [Physical Review Applied](#), 2019, 100(3): 033801.
- [42] YU Z, WU Z, LI X, et al. Interferometry-integrated noise-immune quantum memory[J]. [Physical Review Letters](#), 2023, 131(15): 150804.
- [43] KACZMAREK K T, LEDINGHAM P M, BRECHT B, et al. High-speed noise-free optical quantum memory[J]. [Physical Review Applied](#), 2018, 97(4): 042316.
- [44] MAIN D, HIRD T M, GAO S, et al. Preparing narrow velocity distributions for quantum memories in room-temperature alkali-metal vapors[J]. [Physical Review Applied](#), 2021, 103(4): 043105.
- [45] THOMAS S E, SAGONA-STOPHEL S, SCHOFIELD Z, et al. Single-photon-compatible telecommunications-band quantum memory in a hot atomic gas[J]. [Physical Review Applied](#), 2023, 19(3): L031005.
- [46] THOMAS S E, WAGNER L, JOOS R, et al. Deterministic storage and retrieval of telecom light from a quantum dot single-photon source interfaced with an atomic quantum memory[J]. [Science Advances](#), 2024, 10(15): eadi7346.
- [47] FINKELSTEIN R, LAHAD O, COHEN I, et al. Continuous protection of a collective state from inhomogeneous dephasing[J]. [Physical Review X](#), 2021, 11(1): 011008.