

文章编号: 1007-6654(2012)04-0357-06

^{85}Rb 热原子系综中 Raman 相干存储的实验研究

孟祥栋, 田龙, 张志英, 闫智辉, 李淑静[†], 王海

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 报道了我们在 ^{85}Rb 热原子系统中利用远离共振的 Raman 动力学过程实现相干光信号存储与释放的实验研究。铷原子室采用 μ -metal 包裹消除环境磁场的影响, 在双光子共振和单光子远失谐的条件下, 我们测量了存储效率随存储时间及单光子失谐量的变化关系, 得到的最高存储效率为 23.5%, 寿命约为 3.4 μs 。

关键词: 远离共振的 Raman 动力学过程; 光存储; 存储效率; 存储寿命

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

量子信息操控是目前一个热门的学科领域, 由于量子态光场的存储是实现量子计算机和量子中继器, 进行长距离量子通信的基础^[1], 光量子信息的存储更是引起广泛关注^[2]。众所周知, 光子传播速度快是信息的理想携带者, 实物粒子(如原子)由于易于局域在空间某处是比较理想的信息存储单元, 而原子与光场之间的相干相互作用, 恰恰为量子信息由光场的量子态到实物粒子量子态(自旋)的传递提供了有效途径。在原子系综中利用电磁感应透明效应(EIT), 远离共振的 Raman 动力学过程可以实现光子与实物粒子之间量子态的传输^[3,4], 进而实现光场量子态在原子系综中的存储与释放。1991 年 Harris 小组首次利用脉冲激光在 Λ 型能级铯原子气室中观察到 EIT 效应^[5]。1999 年 Hau 等人^[6]在超冷 Na 原子 BEC 介质中观测到显著的光脉冲群速度减慢效应。2000 年 Fleischhauer 和 Lukin^[8]提出

了利用 EIT 动力学过程实现量子态在原子中的存储的理论方案^[9]; 2001 年, Hau 研究小组^[10]采用 EIT 技术将光子存储在 Na 冷原子系综中。同年, Phillips 等人在铷原子蒸汽中实现了光存储。Kimble 研究小组在冷原子在冷原子介质中实现了单光子的存储与释放^[11]。在非简并能级结构中, 由于频率相差较大, 可以将弱的释放信号光和强的读出光有效地分离开, 因此非简并 EIT 系统被广泛的应用于量子态光场的存储操控。近来一些文献中报道了在非简并 EIT 系统中进行了压缩态光场的存储试验研究^[12-13]。冷原子系综作为光存储介质具有长的消相干时间, 但是冷原子实验系统复杂, 不利于实用化, 热原子系统相对比较简单, 利于实用化。远离共振的 Raman 相干效应可以显著降低热原子系综中由于相互碰撞产生的荧光, 有利于实现量子存储。本文中我们在 ^{85}Rb 热原子系统中利用远离共振的 Raman 动力学过程实现了相干光信号存储与释放。铷原子

收稿日期: 2012-08-23

基金项目: 国家基础研究项目基金(2010CB923103); 国家自然科学基金(10874106; 60821004; 10904086); 山西省青年科技研究基金(2010021003)

作者简介: 孟祥栋(1985—), 男, 河北唐山人, 在读硕士, 研究领域: 量子光学与量子信息。E-mail: xiangdong129@163.com

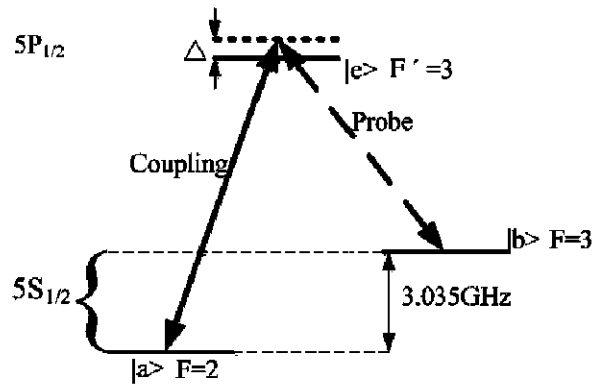
[†] 通讯作者: E-mail: lishujing@sxu.edu.cn

室采用 μ -metal 包裹消除环境磁场的影响共振处,在双光子共振和单光子远失谐的条件下,我们测量了存储效率随时间及失谐量的变化关系,得到了存储信号的最高存储效率为 23.5%,寿命约为 3.4 μ s。

1 远离共振 Raman 过程的光存储

远离共振的 Raman 过程是光与原子相互作用产生的一种非线性光学现象。以 Λ 型三能级结构为例(图 1 所示),由两个基态 $|a\rangle, |b\rangle$ 和一个激发态 $|e\rangle$ 构成。弱光是探针光,强光为耦合光,在耦合光存在的条件下,探针光在双光子共振处的吸收会显著地减小,形成一个透明窗口,这就是所谓的 EIT 透明窗口。在 EIT 透明窗口内部存在着强烈的正色散,根据群速度公式 $V_g = c / (n + \omega \frac{dn}{d\omega})$ 可知,当探针光进入 EIT 介质后,由于 $\omega \frac{dn}{d\omega} \gg 1$,它立刻被减速,在空间上将被压缩,而幅度不变。当探针光脉冲大部分进入到 EIT 介质之后,绝热的关断耦合光,探针光的群速度会被降到零,转化为原子的自旋极化,从而实现光信息的存储。存储一段时间后,开启耦合光,原子的自旋极化转化为光信号,以脉冲的形式从原子介质中释放出来,实现存储信号的读取。探针光和耦合光在满足双光子共振的条件下,单光子远失谐于共振处,这样这两束光与原子相互作用构成的 Λ 型三能级系统进行的光存储实验过程就是远离共振的 Raman 过程,远离共振的 Raman 相干效应可以显著降低热原子系综中由于相互碰撞产生的荧光,有利于实现量子存储。

图 1 是我们进行光存储实验所采用的能级结构,在 ^{85}Rb D1 线选择 $5S_{1/2}, F=2$ 和 $F=3$ 作为两个基态, $5P_{1/2}, F'=3$ 作为激发态,探针光和耦合光分别作用于 $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=3$, $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=3$ 的跃迁谱线上,这两束光与原子相互作用构成 Λ 型三能级系统。



实线为耦合光,虚线为探针光

图 1 光存储实验能级图

Solid line: transition for the coupling field;

Dotted line: transition for the probe field.

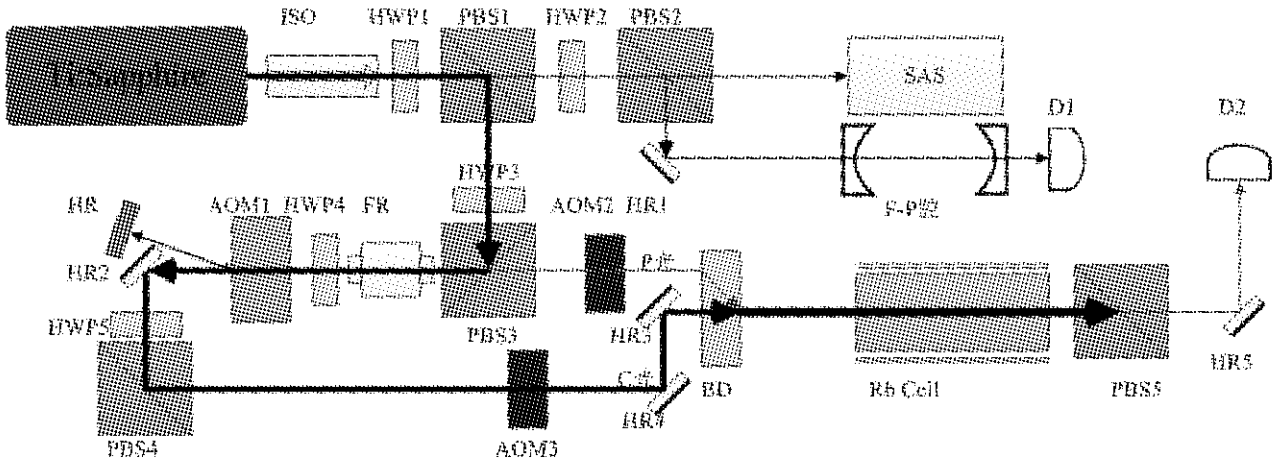
Fig. 1 Relevant energy level diagram of the light storage experiments

2 实验装置及结果

图 2 是光存储实验中所用的装置图。实验中我们选用相干公司生产的 MBR-100 全固态钛宝石激光器作为相干光的光源,将其波长调至 795 nm。钛宝石激光器具有功率高,线宽窄 (<75 kHz),调谐范围宽的优点,是光与原子相互作用实验的很好选择。钛宝石激光器的光经过 $\lambda/2$ 波片和偏振分束棱镜之后,分出一小部分光分别进入到饱和吸收装置(SAS)和共焦 F-P 腔中,饱和吸收装置用来监视激光频率,F-P 腔用来监视激光的模式。主光路,双次穿过 1.7 G 声光调制器 AOM1 后衍射光红失谐 3.035 GHz,这束光作为探针光。第一次经过 AOM1 的零级光作为耦合光。这两束光频率相差 3.035 GHz,满足图 1 中 Λ 型三能级结构的要求。声光调制器 AOM2 和 AOM3 用来控制探针光和耦合光的开启与关断。实验中,两束光的均为线偏光,振动方向互相垂直(探针光为 P 偏振态光,耦合光为 S 偏振光),将两束光调整成匀直光束,其光斑直径均为 4 mm,经偏振位移器 BD40 耦合后两束光完全重合进入原子气室中与发生原子作用。原子气室长度 75 mm 直径为 25 mm。原子气室后放置一个消光比大于 10^{-5} 的 Glan-Thompson 偏振分束棱镜用来过滤掉耦合光,探测器 D2 对探针光的存储释放信号进行探测。为了延长原子的相干作用

时间,我们选用的是充满 10 Torr Ne 缓冲气体的纯 ^{85}Rb 原子池作为原子气室,通过给 Rb 泡包裹 μ -metal 的方法来消除杂散磁场的影响,并将包裹好的 Rb 泡放置于双层磁屏蔽筒子中,进一

步降低杂散磁场的影响。实验中我们将原子气室的温度精确控制在 45°C , 探针光脉冲的峰值功率为 $45\ \mu\text{W}$, 耦合光脉冲峰值功率为 $80\ \text{mW}$ 。



Ti:Sapphire 全固态钛宝石激光器; ISO: 光隔离器; SAS: 饱和吸收装置; F-P: 法布里-波罗干涉仪; HWP: 二分之一波片; PBS: 偏振分束棱镜; AOM1: 1.7 GHz 声光调制器; AOM2, AOM3: 200 MHz 声光调制器; BD: 偏振位移器; HR: 高反镜; FR: 法拉第光学旋转器; D1, D2: 光电探测器。

图 2 光存储实验装置图

ISO: optical isolator; HWP: half wave plate; SAS: setup of saturated-absorption spectroscopy; F-P: C, Fabry, A, Perot interferometer; PBS: polarizing beam splitter; AOM1: 1.7 GHz acousto-optical modulator; AOM2 and AOM3: 200 MHz acousto-optical modulators; BD: beam displacer; HR: high reflectivity mirror; FR: faraday rotation; D1 and D2: photo detector.

Fig. 2 Experimental setup

图 3 是光存储实验中所用的时序控制。首先将耦合光开启,把原子制备到 $5P_{1/2}, F'=3$ 能级上,然后一个 500 ns 脉宽的探针光注入原子气室中,当大部分探针光脉冲进入到 Rb 原子气室后,关断耦合光,这样探针光就被存储在原子介质中。间隔一定的存储时间后,开启耦合光,存储在原子介质中的信息以光脉冲的形式释放出来,被探测器探测 D2 测到。

光脉冲存储恢复信号的全貌,存储时间为 400 ns。图中第一个脉冲为探针光的输入信号,虚线为无原子无耦合光时的探针光脉冲,实线是原子气室和耦合光同时存在的探针光脉冲,图中第二个脉冲是读出的释放信号。根据存储效率计算公式 $A = \int |\xi_p^{\text{out}}|^2 dt / \int |\xi_p^{\text{in}}|^2 dt$, 通过对输入的探针光脉冲(无原子时)和释放光脉冲的面积进行积分可以计算出这时脉冲光的效率为 21.5%。

我们研究了存储效率随存储时间的变化。将单光子频率调至 $^{85}\text{Rb} 5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=3$ 的跃迁谱线蓝失谐 700 MHz 处,改变存储时间,测得了不同存储时间下的效率。我们给出了存储效率随时间的变化曲线,是实际测量值,从图中可以看出释放信号的效率随时间的延长呈逐渐下降趋势。在存储时间为 400 ns 时存储效率为 21.5%, 存储时间为 $3.4\ \mu\text{s}$ 效率为 7.85%。我们根据寿命计算公式 $\tau = A * \exp^{-t/\tau}$ 进行了理

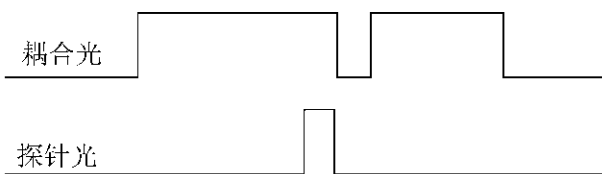
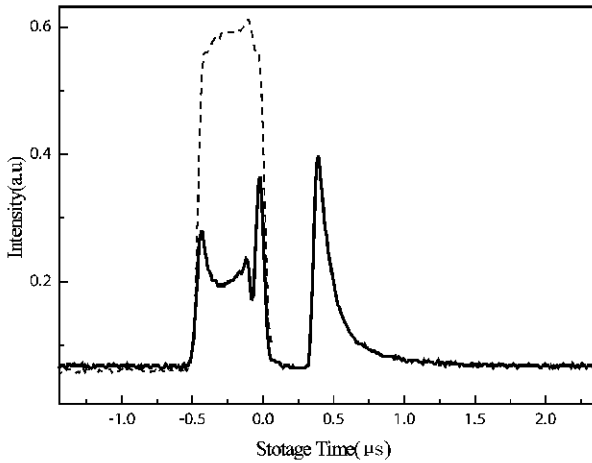


图 3 光存储实验时序

Fig. 3 The sequence control signals

实验中我们首先得到了存储释放信号(如图 4),图 4 是双光子共振单光子蓝失谐 700 MHz,



图中第一个脉冲为探针光的输入信号,虚线为无原子无耦合光时的探针光脉冲,实线是激光频率在⁸⁵Rb原子共振跃迁谱线大失谐处且耦合光同时存在的探针光脉冲,图中第二个脉冲是读出的释放信号。存储时间为400 ns,耦合光的峰值功率为80 mW,探针光峰值功率为45 μW。

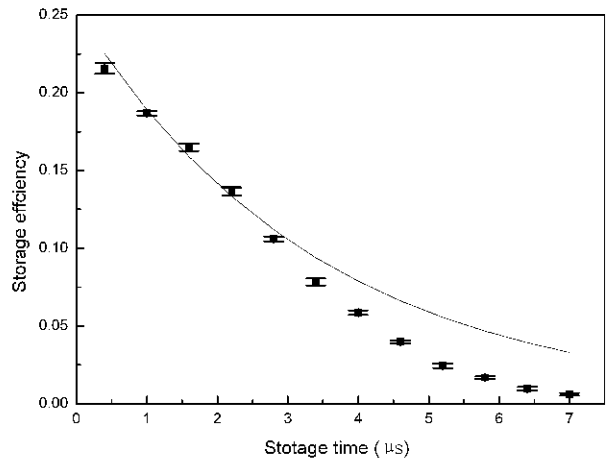
图4 实验探测到的存储释放信号

The first pluse is the input probe signal, the dotted line is the one without atoms and coupling beams; the solid line is the one in the presence of the atoms and coupling beams; the second pluse is the retrieved signal. The storage time is 400 ns, the peak power of the coupling beam is 80 mW, the peak power of the probe beam is 45 μW.

Fig. 4 The sorage retrieval signal measured in experiment

论曲线,取合适的 $t_0 = 3.5 \mu s$,我们得到了理论拟合曲线,如图5中的实线所示,通过比较,在 $2.8 \mu s$ 之前实际值与理论值基本吻合,之后实际值要低于理论值。这是因为我们包裹的磁屏蔽装置中会有残余的杂散磁场,随着存储时间的延长,残留的杂散磁场引起的原子退相干效果会越来越明显,降低释放信号的效率,从而影响存储信号的寿命。根据实际数据和理论拟合我们可以得出我们实验中释放信号的寿命约为 $3.4 \mu s$ 。

实验中我们还研究了光存储释放效率对单光子频率失谐量的依赖关系,在保持其他参量不变的情况下,我们改变激光频率,即在不同的单光子频率失谐情况下,我们测量了在存储时间为400 ns处不同失谐量下的存储效率,并给出了其变化曲线(如图5)。所示从图中可以看出存储效率在失谐为0—800 MHz之间随着失谐量的增大



图中的实际测量值,实线为理论拟合曲线。

图5 存储效率随存储时间的变化关系
Is he actual measured value; the solid line is the curves of storage efficiency as a function of the storage time.

Fig. 5 Storage efficiency as a function of the storage time

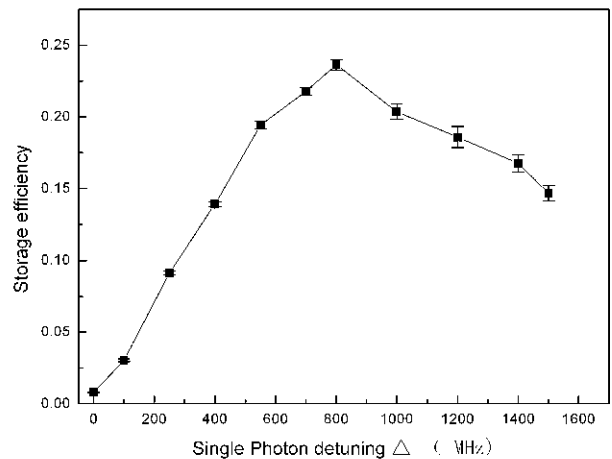


图6 存储效率随单光子失谐量的变化关系

Fig. 6 Storage efficiency as a function of single photo detuning

而增大,当失谐量 $\Delta = 800 \text{ MHz}$ 的时候,存储效率最大为23.5%,再增大失谐量,效率降低,当失谐量达到1.5 GHz时,存储效率降为14.6%。下面我们简单分析下存储效率随单光子失谐量的变化。在单光子失谐量 $\Delta = 0$ 的时,虽然EIT透明窗口效果最好,但是探针光频率正好处于 $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=3$ 的共振跃迁谱线上,探针光被大量吸收,从而导致释放信号的效率很低。继续增大失谐量 Δ ,由于EIT透明窗口随着单光子失谐量的增大不会发生很大的变化,既可

以降低原子对探针光的吸收,同时还有较好的 EIT 透明窗口,所以释放信号的效率变大,在 800 MHz 处获得最大的存储效率。继续增大失谐量,虽然探针光的吸收可以进一步降低,但是这时候由于失谐量太大,严重影响了 EIT 透明窗口效果,使得存储效率也降低。

3 总结

实验中我们通过给纯 ^{85}Rb 原子池加 μ -metal 和磁屏蔽筒子的方法消除外界杂散磁场的影响,

在此基础上我们利用远离共振的 Raman 动力学过程实现了相干光信号存储与释放。在双光子共振和单光子远失谐的条件下,我们测量了存储效率随存储时间及单光子失谐量的变化关系。在单光子失谐 700 MHz,我们得到存储效率为 21.5% 寿命约为 3.4 μs 的存储释放信号,在单光子失谐 800 MHz 获得释放信号存储效率最大,其效率为 23.5%。我们的研究可为下一步进行光场正交分量存储的原子记忆提供了基础。

参考文献:

- [1] BRIEGEL H J, DÜR W J, CIRAC I, *et al.* Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **81**: 5932-5935.
- [2] FLEISCHHAUER M, LUKIN M D. Quantum memory for photons: Dark-state polaritons [J]. *Phys Rev A*, 2002, **65**: 022314.
- [3] 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**: 413-418.
- [4] MATSUKEVICH D N, KUZMICH A. Quantum state Transfer Between matter and light [J]. *Science*, 2004, **306**: 663-666.
- [5] BOLLER K-J, IMAMOLU A, HARRIS S E. Observation of Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **66**: 2593-2596.
- [6] KASH M M, SAUTENKOV V A, ZIBROV A S, *et al.* Ultraslow Group Velocity and Enhanced Nonlinear Optical Effects in a Coherently Driven Hot Atomic Gas [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**: 5229.
- [7] BUDKER D, KIMBALL D F, ROCHESTER S M, *et al.* Nonlinear Magneto-optics and Reduced Group Velocity of Light in Atomic Vapor with Slow Ground State Relaxation [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**: 1767.
- [8] FLEISCHHAUER M, LUKIN M D. Dark-state Polaritons in Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 5094.
- [9] PHILLIPS D F, *et al.* Storage of Light in Atomic Vapor [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**: 783.
- [10] LIU C, DUTTON Z, BOHROOZI C H, *et al.* Observation of Coherent Optical Information Storage in an Atomic Medium Using Halted Light Pulses [J]. *Nature*, 2001, **409**: 490.
- [11] CHOI K S, DENG H, LAURAT J, *et al.* Mapping Photonic Entanglement into and Out of a Quantum Memory [J]. *Nature*, 2008, **452**: 67-71.
- [12] KAZUHITO HONDA, DAISUKE AKAMATSU, MANABU ARIKAWA, *et al.* Storage and Retrieval of a Squeezed Vacuum [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**: 093601.
- [13] JÜRGEN APPEL*, EDEN FIGUEROA, DMITRY KORYSTOV, *et al.* Quantum Memory for Squeezed Light [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**: 093602.

The Investigation of the Raman-Coherent Storage in ^{85}Rb Hot Atom Ensemble

MENG Xiang-dong, TIAN Long, ZHANG Zhi-ying,
YAN Zhi-hui, LI Shu-jing, WANG Hai

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

Abstract: By using off-resonant Raman dynamic, we investigate the storage and release of light in atomic rubidium vapor. μ -metal shielding wrap the Rubidium cell to eliminate the influence of environmental magnetic field, under the condition of two-photon resonance and single photon detuning, We measured the changes in the relationship between storage efficiency with storage time and single-photon detuning. In our experiment, the highest storage efficiency of the stored signal is 23.5%, and its life is about 3.4 μs .

Key words: off-Raman dynamic; light storage; storage efficiency; storage time