

文章编号: 1007-6654(2015)02-0113-05^①

自旋波波长对量子存储寿命的影响研究

徐忠孝, 陈力荣, 李萍, 温亚飞, 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: 利用电磁感应透明效应的动力学过程我们在⁸⁷Rb冷原子系综中实验实现光学信号的存储和释放。通过改变信号光和耦合光的角度实现了自旋波波长的变化。在此基础上我们研究了存储寿命与自旋波波长的关系, 结果表明, 光存储寿命随自旋波波长(角度)的增加(减小)而增加, 当自旋波波长大于 2.2 nm (信号光和耦合光的角度小于 0.02 度)时, 存储寿命可达到 2.4 ms。

关键词: 长寿命; 自旋波波长; 冷原子系综

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20152102.0113

0 引言

长寿命的量子存储对量子信息及量子信息处理过程是非常重要的部分^[1-7], 但是由于受实验环境噪声, 以及其他条件的影响, 存储寿命受到了很大的限制, 一直以来有很多小组在基于 EIT 的量子存储^[8-10]方面做出了很大贡献, 2008 年 Kimble 小组实现了将纠缠光子对分别存储在两个独立的原子系综中实现了纠缠光子对的存储, 纠缠存储时间为 8 μs ^[11]; 2011 年, 潘建伟小组将腔内 PPKTP 晶体产生的纠缠光子对中的一个光子进行投影后分别存储在了两套原子系综中, 以此来任意偏振态的存储, 存储时间约为 2 μs ^[12]; 同年, Rempe 小组将纠缠光子存储在 BEC 系统中, 得到了 470 μs 的存储寿命^[13]。我们的实验中我们在原子系综上施加 13.5 G 的磁场, 使偏振信息只存储在原子的两个磁不敏感跃迁上^[14], 通过这种办法可以极大的避免环境噪声

的影响, 另外使用信号光与控制光共线的方式来极大地增加暗态极子的自旋波长, 通过这两种办法, 我们在基于电磁感应透明效应的光脉冲存储实验中得到了存储寿命 2 ms 的结果。该实验在量子网络和量子信息处理中有重要的意义。

1 基于 EIT 的光学存储

电磁感应透明是光与原子相互作用中由原子相干导致的光透明效应, 图 1 所示的 Λ 型原子能级结构由两个基态 $|a\rangle, |b\rangle$ 和一个激发态 $|e\rangle$ 组成。信号光为弱光, 是信息的携带者; 耦合光较强, 用来产生量子相干效应。如果耦合光不存在, 信号光与二能级原子共振作用, 被部分或完全吸收。在有耦合光的情况下, 信号光在近共振处的吸收被极大地减小, 出现透明窗口。根据 Kramers Kronig 关系, 吸收的改变伴随着色散的改变。在 EIT 条件下, 信号光经历大的正常色

① 收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-02-02

基金项目: 973 计划(2010CB923103); 国家自然科学基金(11475109; 11274211; 60821004)

作者简介: 徐忠孝(1985-), 男, 山西汾阳人, 博士研究生, 主要从事量子光学和光与原子相互作用方面的研究。

E-mail: xuzhongxiao36@163.com

[†] 通信作者: E-mail: wanghai@sxu.edu.cn

散,这就意味着它的群速度要降低,而光减速是光存储的基础。与 EIT 窗口共振的信号光脉冲进入 EIT 介质后群速度减小,光脉冲在空间上被

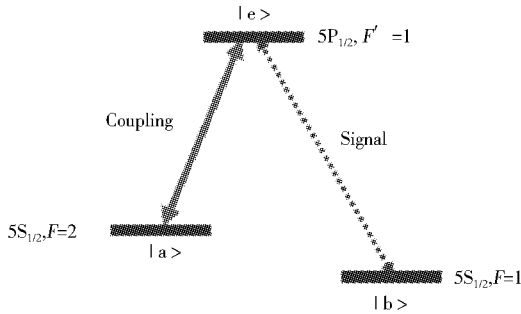


Fig. 1 Relevant energy level diagram; Solid line, transition for the coupling field; dotted line, transition for the signal field.

图 1 能级图:实线为耦合光,虚线为信号光压缩,初始在空间上远大于原子团尺寸的光脉冲就可以被压缩到原子团中。存储释放由暗态极子理论来描述,暗态极子^[15-19]表示为:

$$\varphi(z, t) = \cos\theta(t) E(z, t) - \sin\theta(t) \sqrt{N} S_{ab}(z, t)$$

$$S_{ab}(z, t) = N_z^{-1} \sum_{j=1}^{N_z} |a_{m_F=a}\rangle \langle b_{m_F=b}| e^{ikz}$$

表示,式中 $S_{ab}(z, t)$ 为原子自旋极化, $E(z, t)$ 为信号光场, $\cos\theta(t) = \frac{\Omega(t)}{\sqrt{\Omega^2(t) + g^2 N}}$, $\sin\theta(t) =$

$\frac{\sqrt{g^2 N}}{\sqrt{\Omega^2(t) + g^2 N}}$ 为信号光和原子的耦合常数。暗态极子在介质中的传播群速度为 $v = v_g(t) =$

$cc\cos^2\theta(t)$ 。当耦合光被绝热地关断时, θ 随时间由 0 变化到 $\pi/2$, 信号光转化为原子的自旋极化, 且群速度为 0, 即信号光被存储到原子介质中, 转化为两基态之间的自旋极化 $S_{ab}(z, t)$; 存储一段时间后, 耦合光被绝热开启, 这时 θ 由 $\pi/2$ 变化到 0, 原子自旋极化 $S_{ab}(z, t)$ 又转化成光信号从原子中被释放出来^[20]。

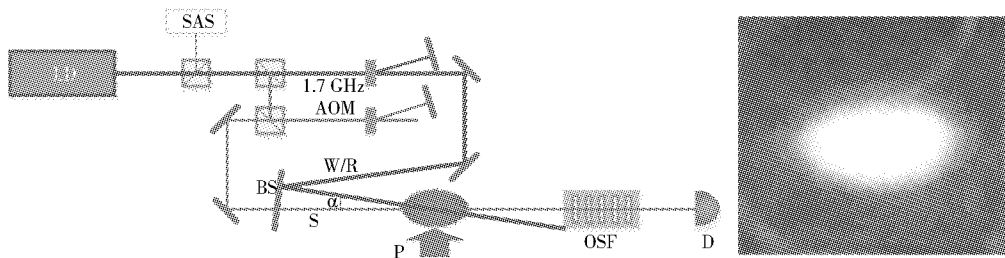


Fig. 2 Experimental setup, S; Signal pulse; W/R; Coupling light; P; linear pump light; OSF; Optical spectral filters; D; C5331 detector; α ; Angle between signal and coupling light.

图 2 实验装置图, S; 信号光 (Signal); W/R; 耦合光 (Coupling); P; 线偏泵浦光; OSF; 滤波系统 (Optical spectral filters); D; C5331 探测器; α ; 信号光与耦合光之间的夹角。

2 实验装置

实验装置如图 2 左所示, 信号光和控制光由同一台锁定在 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=1$ 的 Topica 激光器提供, 激光首先经过一个棱镜 PBS 分出一小部分光用于激光器的锁定, 剩余的光经过两个双次通过 1.7 GHz 声光调制器移频到原子的共振吸收线 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=1$ 处, 作为信号光 (Signal), 光功率 $16 \mu\text{W}$, 光斑直径 0.5 mm。其中经过第一个 1.7 GHz AOM 后的零级光作为耦合光 (W/R) 光功率 12 mW, 光斑直径 2 mm。信号光与耦合光经耦合镜后共同作用在原子上 (耦合镜 BS, S1 : T = 80%, S2 : AR coating), 释放出的光信号经过一组标准具组

成的滤波系统 (Optical spectral filters: 由 5 个独立控温的厚 7.5 mm 两面镀有 90% 反射率的标准具组成) 对耦合光滤波后, 用 C5331 探测器进行探测。

存储介质是磁光阱俘获得到的 ⁸⁷Rb 冷原子系综如图 2 右, 在磁光阱 (MOT) 中, 冷却光锁定在跃迁 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'=3$ 负失谐 24.5 MHz 处, 每束功率为 20 mW, 光斑直径为 3 cm, 再泵浦光锁定在 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5P_{3/2}, F'=1$ 的共振跃迁线上, 功率为 9 mW, 俘获磁场由一对长宽比为 2.3 : 1 的矩形反向亥姆霍兹线圈提供, 线圈 25 匝电流为 25.8 A, 这样我们得到了一个长轴方向梯度为 2.5 G/cm, 短轴方向梯度为

10 G/cm的反向亥姆霍兹磁场,在该 MOT 系统下我们得到了一个 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的雪茄

形原子团,原子数为 10^{10} 个,温度约为 $250\text{ }\mu\text{K}$,光学厚度为 7。

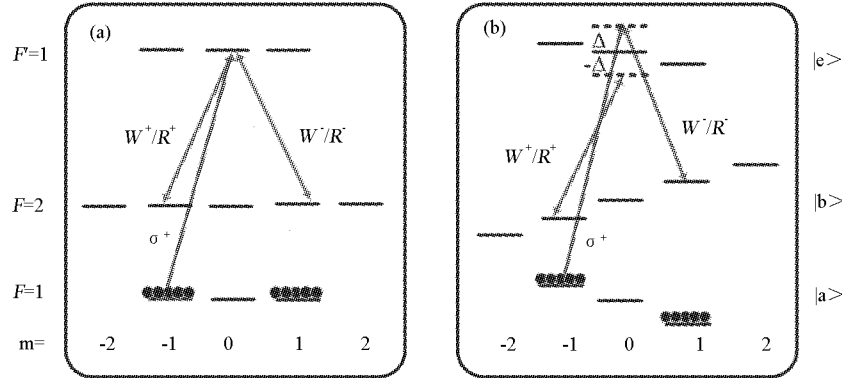


Fig. 3 Relevant energy level diagram, a, Atomic level scheme with a weak magnetic field, b, Atomic level scheme with a 13.5 G magnetic field

图 3 实验能级图, a 弱磁场能级图, b 为加上 13.5 G 的轴向磁场的情况下能级分裂能级图

3 实验能级

实验能级图如图 3 所示,首先我们为了实现任意偏振的存储^[14],将原子制备到了基态能级 $m_F=1$ 和 $m_F=-1$ 上,本文的实验只对任意偏振的右旋分量进行了存储释放研究,在弱轴向磁场情况时,右旋信号光会与线偏控制光形成 2 个 EIT 三能级系统图 3(a),其中一个为磁敏感跃迁 SW_{-1-1} ,另一个为磁不敏感跃迁 SW_{-11} ,由我们之前的工作分析^[14]可以知道,由于磁敏感自旋波的干涉效应会导致存储信号有 3/4 的衰减,且存储寿命会变的很短,为了克服磁敏感自旋波对存储效率以及存储寿命的影响,我们在光与原子相互作用区域施加了一个沿信号光的传播方向 13.5 G 的磁场,来确定量子化轴,当该磁场作用到原子上时,由于基态能级分裂的不均匀性,右旋信号光与写光仅能形成一套磁不敏感的 EIT 三能级系统,光脉冲分别转化为 SW_{-11} 自旋波存储在原子系统中,而磁敏感跃迁由于不能形成双光子共振而形不成 EIT。这样可以有效增大信号光的存储寿命和存储效率。

4 实验结果

在该实验方案下我们进行了光脉冲的存储和释放实验。通过改变耦合光和信号光的角度,观察了光信号存储寿命随信号光和耦合光角度

变化的关系,原子的自旋极化表示为:

$$S_{ab}(z, t) = N_z^{-1} \sum_{j=1}^{N_z} |a_{m_F=a}\rangle \langle b_{m_F=b}| e^{i\Delta k z}$$

其中 $\Delta k = k_w - k_s = k_w \sin \alpha$, α 为信号光与耦合光的角度, $k_w = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是写光的波矢^[16],原子自旋波波长公式可以表示为

$$\lambda_{sw} = \frac{2\pi}{\Delta k}$$

由上公式我们可以看出自旋波波长与 Δk 成反比的关系,通过改变信号光与耦合光的角度,我们测量了存储寿命与信号光耦合光角度的变化关系,结果如图 4 所示,图中的曲线分别为耦

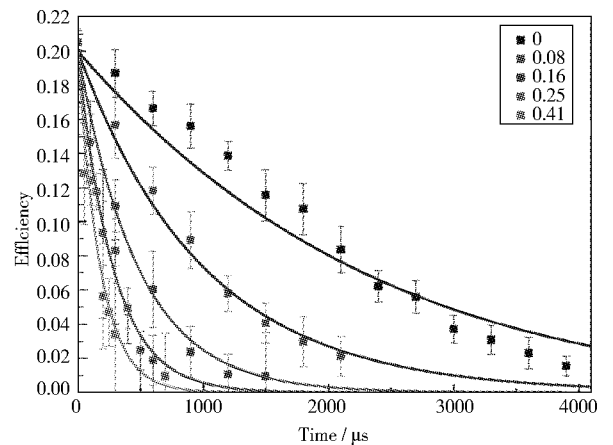


Fig. 4 In different angle α , Storage lifetime as change of the time

图 4 在不同角度 α 情况下,存储效率随时间的变化图

合光与信号光的角度是 0 度, 0.08 度, 0.16 度, 0.25 度, 0.41 度时光脉冲存储效率随时间的变化曲线, 从图中结果我们可以知道, 当角度为 0.41 度时存储寿命很短, 仅为 $200 \mu\text{s}$, 我们不断的减小信号光与耦合光的角度, 角度小于 0.02 度时存储寿命达到了 2.4 ms, 由上图的结果我们可以得出随着信号光和耦合光角度变小存储寿命明显的提高, 当信号光和耦合光的角度小于 0.02 度时, 存储寿命达到了 2.4 ms。

通过计算我们得到在 α 角度分别为 0.02 度, 0.08 度, 0.16 度, 0.25 度和 0.41 度时分别对应的自旋波波长 λ_{sw} 为 2.2 mm, $569 \mu\text{m}$, $285 \mu\text{m}$, $182 \mu\text{m}$, $111 \mu\text{m}$ 。

图 5 是信号光和耦合光在不同 α 角度情况下, 计算得到的自旋波波长和实验得到的存储寿命对比图, 从图中可以看出, 自旋波波长与存储寿命有着几乎相同的衰减趋势。我们分析存储寿命衰减的原因是, 由于原子的热运动导致的退相干。在相同的原子温度, 即原子扩散速度一致的情况下, 自旋波波长越短原子的热运动导致自旋波退相干的时间越短, 从而寿命越短。

5 小结

本文研究了基于电磁感应透明效应的光存

参考文献:

- [1] Lvovsky A I, Sanders B C, Tittel W. Optical Quantum Memory[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**:706-714.
- [2] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, Zoller P. Long-distance Quantum Communication with Atomic Ensembles and Linear Optics[J]. *Nature*, 2001, **414**:413-418.
- [3] Sangouard N, Simon C, Minář J, et al. Long-distance Entanglement Distribution with Single-photon Sources[J]. *Physical Review A*, 2007, **76**:050301.
- [4] Chen Z B, Zhao B, Chen Y A, et al. Fault-tolerant Quantum Repeater with Atomic Ensembles and Linear Optics[J]. *Physical Review A*, 2007, **76**:022329.
- [5] Sangouard N, Simon C, Zhao B, et al. Robust and Efficient Quantum Repeaters with Atomic Ensembles and Linear Optics[J]. *Physical Review A*, 2008, **77**:062301.
- [6] Simon C, H. de Riedmatten, Afzelius M, et al. Quantum Repeaters with Photon Pair Sources and Multimode Memories[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **98**:190503.
- [7] Sangouard N, Simon C, H. de Riedmatten, et al. Quantum Repeaters Based on Atomic Ensembles and Linear Optics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, **83**:33-80.
- [8] Boller K J, Imamolu A, Harris S. Observation of Electromagnetically Induced Transparency[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **66**:2593-2596.

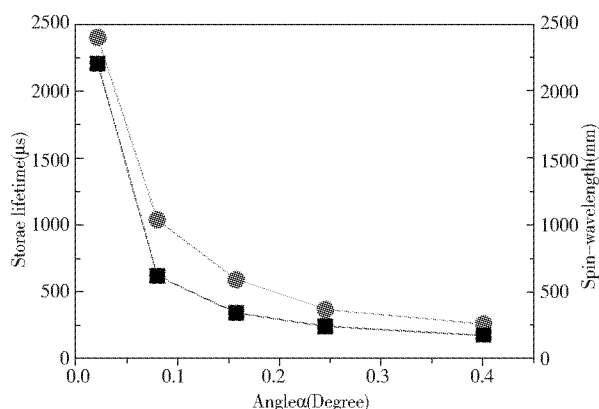


Fig. 5 Contrast diagram between lifetime curve (dots) and Spin-wave length curve (square)

图 5 寿命随角度变化(圆点)和自旋波波长随角度变化(方点)的对比图

储寿命与暗态极子自旋波波长的关系, 实验结果表明, 光存储寿命随自旋波波长的增加而增加, 也即光存储寿命随信号光与耦合光角度的减小而增加, 当信号光与耦合光角度小于 0.02 度时, 自旋波波长大于 2.2 mm, 此时我们得到了 2.4 ms 的存储寿命。该实验结果对下一步实现纠缠光子对的长寿命存储奠定了基础。

- [9] Gea-Banacloche J, Li Y q, Jin S-z, *et al.* Electromagnetically Induced Transparency in Ladder-type Inhomogeneously Broadened Media; Theory and experiment[J]. *Physical Review A*, 1995, **51**:576-584.
- [10] M. Xiao, Y.-q. Li, S.-z. Jin, *et al.* Measurement of Dispersive Properties of Electromagnetically Induced Transparency in Rubidium Atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1995, **74**:666-669.
- [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] Zhang H, Jin X M, Yang J, *et al.* Preparation and Storage of Frequency-uncorrelated Entangled Photons from Cavity-enhanced Spontaneous Parametric Downconversion[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**:628-632.
- [13] Lettner M, Mücke M, Riedl S, *et al.* Remote Entanglement between a Single Atom and a Bose-Einstein Condensate[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, **106**:210503.
- [14] Xu Z, Wu Y, Tian L, *et al.* Long Lifetime and High-Fidelity Quantum Memory of Photonic Polarization Qubit by Lifting Zeeman Degeneracy[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **111**:240503.
- [15] Fleischhauer M, Lukin M D. Dark-State Polaritons in Electromagnetically Induced Transparency[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**:5094-5097.
- [16] Wang H, Li S, Xu Z, *et al.* Quantum Interference of Stored Dual-channel Spin-wave Excitations in a Single Tripod System[J]. *Physical Review A*, 2011, **83**:043815.
- [17] Joshi A, Xiao M. Generalized Dark-state Polaritons for Photon Memory in Multilevel Atomic Media[J]. *Physical Review A*, 2005, **71**:041801.
- [18] H S E. Electromagnetically Induced Transparency[J]. *Phys Today*, 1997, **50**:36-42.
- [19] Fleischhauer M, Lukin M. Quantum Memory for Photons; Dark-state Polaritons[J]. *Physical Review A*, 2002, **65**:022314.
- [20] 赵兴波, 徐忠孝, 张利军, 等.⁸⁷Rb冷原子 EIT 介质中光学信号存储与释放的实验研究[M]. *量子光学学报*, 2010, **16**:196-201.
- [21] Zhao B, Chen Y A, Bao X H, *et al.* A Millisecond Quantum Memory for Scalable Quantum Networks[J]. *Nature Physics*, 2009, **5**:95-99.

The Investigation of Relationship between Quantum Storage Lifetime and Spin-wave Length

XU Zhong-xiao, CHEN Li-rong, LI Ping, WEN Ya-fei, WANG Hai

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

Abstract: With the electromagnetically induced transparency (EIT) dynamics, we realized the storage and release of optical signals in ⁸⁷Rb cold atoms. We realized the change of Spin-wave length when varying the angle between signal and coupling light. Based on this, we studied the relationship between the storage lifetime and the Spin-wave length. Experimental results showed that the storage lifetime increases (decreases) with the length of Spin-wave (angle). When the spin-wave length exceeds 2.2 mm (the angle between signal and coupling light less than 0.02 degree), the storage lifetime can reach 2.4 ms.

Key words: long lifetime; spin-wave length; cold atomic ensemble