

两正交偏振光存储寿命与导向磁场的依赖关系

李萍, 徐忠孝, 陈力荣, 温亚飞, 曾炜卿, 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: 在不同导向磁场条件下, 利用电磁感应透明效应(EIT)动力学过程, 在⁸⁷Rb冷原子系综中进行了两正交偏振光存储和释放的实验研究。研究表明: 随着导向磁场的增加, 磁敏感自旋波对存储寿命的影响不断减小, 存储寿命逐渐增大, 当磁场增加到 12.5 G 时, 存储寿命达到 1.5 ms。

关键词: 长寿命存储; 导向磁场; 磁不敏感态; 冷原子系综

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20152103.0210

0 引言

长寿命量子存储是建立量子网络和实现远距离量子通信的重要工具^[1-7]。近年来人们对基于 EIT 的量子存储^[8-10]进行了深入研究。2005 年, Georgia 工学院 Kuzmich 研究组在两个远距离的 EIT 介质中实现了单光子存储和释放^[11]。2008 年, 美国 Kimble 小组通过 EIT 动力学过程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与释放, 其纠缠存储时间为 8 μs ^[12]; 2011 年, 德国 Rempe 研究小组将量子偏振比特存储在 Rb 原子 BEC 介质的两个磁敏感相干性上, 并且通过测量反馈技术降低了磁场噪声, 得到了 470 μs 的存储寿命^[13]。2013 年, 我们小组将一个中等强度的磁场(13.5 G)施加到冷原子上消除其 Zeeman 能级简并性, 使单光子量子比特信息仅存储在两正交的磁不敏感自旋波上, 而磁敏感自旋波对量子记忆的影响被消除, 获得了 1.6 ms 的长寿命存储^[14]。在

中等强度的磁场下可以增加存储寿命, 但磁场越强, 自旋波的拉莫尔进动频率加快, 施加磁场所需时间就会增大, 不利于量子存储的操控。为了在最佳的磁场条件下获得较高的光量子存储寿命, 我们研究了两正交偏振光存储寿命与导向磁场强度之间的依赖关系。研究表明: 随着导向磁场的增加, 磁敏感自旋波对存储寿命的影响不断减小, 存储寿命逐渐增大, 当磁场为 12.5 G 时, 存储寿命达到 1.5 ms。

1 实验方案与装置

图 1(a)为实验能级图, 其中 $|a\rangle = |5^2S_{1/2}, F=1\rangle$, $|b\rangle = |5^2S_{1/2}, F=2\rangle$, $|e\rangle = |5^2P_{1/2}, F'=1\rangle$, 原子制备在基态能级 $|a_{m=1}\rangle$ 和 $|a_{m=-1}\rangle$ 上, 信号光作用在 $|a\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ 跃迁上, 耦合光作用在 $|b\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ 跃迁上。信号光为左旋圆偏振光或右旋圆偏振光, 左旋圆偏振光作用于 $|a_m\rangle \leftrightarrow |e_{m+1}\rangle$, 右旋圆偏振光作用于 $|a_m\rangle \leftrightarrow |e_{m-1}\rangle$ 跃迁

^① 收稿日期: 2015-05-14; 修回日期: 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(11475109, 11274211, 60821004)

作者简介: 李萍(1989-), 女, 山西文水人, 硕士研究生, 主要从事量子光学和光与原子相互作用方面的研究。E-mail: liping123happy@163.com

[†] 通信作者: 王海, E-mail: wanghai@sxu.edu.cn

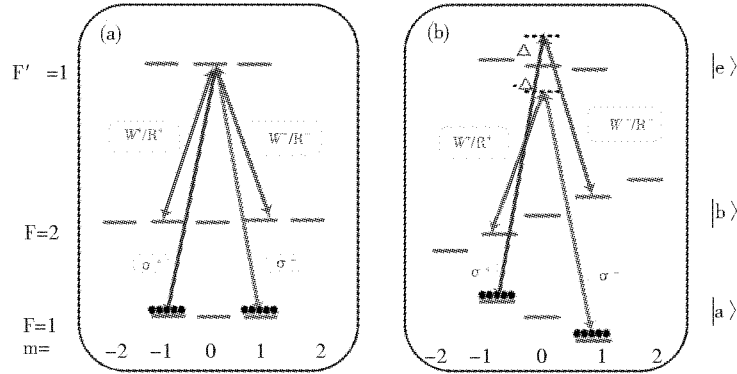


Fig. 1 Relevant energy level diagram, a, Atomic level scheme with a weak magnetic field, b, Atomic level scheme with a strong magnetic field

图 1 (a)弱磁场下的实验能级图, (b)强磁场下的实验能级图

上;耦合光为线偏振光,其左旋分量作用于 $|b_m\rangle \leftrightarrow |e_{m+1}\rangle$,右旋分量作用于 $|b_m\rangle \leftrightarrow |e_{m-1}\rangle$ 跃迁上。信号光和耦合光满足 Zeeman 简并情况下 $|a\rangle \leftrightarrow |b\rangle$ 的双光子共振。当磁场为弱磁场时,能级 $F=1$ 和 $F=2$ 的 Zeeman 简并分裂小,如图 1(a)所示,在这样的情况下,左旋圆偏光在与线偏振的写光作用后形成两个三能级 Λ 原子系统:一个为 $|a_{m=-1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=1}\rangle$,其自旋极化为 $S_{-1,1}$,是磁不敏感(magnetic-field-insensitive, MFI)自旋波;另一个为 $|a_{m=-1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=-1}\rangle$,其自旋极化为 $S_{-1,-1}$,是磁敏感(magnetic-field-sensitive, MFS)自旋波。当关断写光时信号光脉冲转换为两个自旋相干性 $S_{-1,1}$ 、 $S_{-1,-1}$ 存储在原子系综中。同样,右旋圆偏光在与线偏振的写光作用后也形成两个三能级 Λ 原子系统: $|a_{m=1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=-1}\rangle$,其自旋极化为 $S_{1,-1}$,是磁不敏感自旋波; $|a_{m=1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=1}\rangle$,其自旋极化为 $S_{1,1}$,是磁敏感自旋波。当关断写光时信号光脉冲转换为两个自旋相干性 $S_{1,-1}$ 、 $S_{1,1}$ 存储在原子系综中。随着导向磁场的增强,由于 Zeeman 分裂,能级 $F=1$ 和 $F=2$ 不再简并,如图 1(b),左旋圆偏信号光与线偏写光形成磁不敏感的 EIT 三能级系统 $|a_{m=-1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=1}\rangle$,并且随着导向磁场的增强,一直满足双光子共振;而磁敏感的 EIT 三能级系统 $|a_{m=-1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=-1}\rangle$,双光子失谐 Δ 随磁场增强逐渐增大,因此随着导向磁场强度增强,

磁敏感自旋波存储效率逐渐降低,其存储权重逐渐减小。同样,右旋圆偏光与线偏写光形成磁不敏感的 EIT 三能级系统 $|a_{m=1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=-1}\rangle$,随着导向磁场的增强,一直满足双光子共振;而磁敏感的 EIT 三能级系统 $|a_{m=1}\rangle - |e_{m=0}\rangle - |b_{m=1}\rangle$,双光子失谐 Δ 随磁场增强逐渐增大,磁敏感自旋波的存储效率也逐渐降低,其存储权重逐渐减小。

左旋圆偏振光总的自旋波 $S(S = S_{-1,1} + S_{-1,-1})$ 随时间变化的存储效率 $\eta^+(t)$ 为:

$$\eta^+(t) = \eta_0 \left| P_1 e^{\frac{-t}{\tau_{-1,1}}} e^{i\omega_{-1,1}t} + P_2 e^{\frac{-t}{\tau_{-1,-1}}} e^{i\omega_{-1,-1}t} \right|^2 \quad (1)$$

其中, $\omega_{m,m'} = \frac{\mu_B B_0}{\hbar} (g_a(m+m') - \delta g m')$, $\omega_{m,m'}$

是自旋波 $S_{m,m'}$ 的拉莫尔频率, B_0 是沿 Z 方向的磁场强度, Landé 因子 $g_a \approx -0.5018$, $g_b \approx 0.4998$, $\delta g = g_a + g_b \approx -0.002$ 。 η_0 是初始存储效率, $\tau_{-1,1}$ 为磁不敏感自旋波 $S_{-1,1}$ 的存储寿命。 $\tau_{-1,-1}$ 为磁敏感自旋波 $S_{-1,-1}$ 的存储寿命。 P_1 和 P_2 分别是磁不敏感自旋波 $S_{-1,1}$ 和磁敏感自旋波 $S_{-1,-1}$ 的存储权重。

同样,右旋圆偏振光总的自旋波 $S'(S' = S_{1,-1} + S_{1,1})$ 随时间变化的存储效率 $\eta^-(t)$ 为:

$$\eta^-(t) = \eta_0 \left| P_1 e^{\frac{-t}{\tau_{1,1}}} e^{i\omega_{1,1}t} + P_2 e^{\frac{-t}{\tau_{1,-1}}} e^{i\omega_{1,-1}t} \right|^2 \quad (2)$$

其中, $\tau_{1,-1}$ 为磁不敏感自旋波 $S_{1,-1}$ 的存储寿

命。τ_{1,1}为磁敏感自旋波 S_{1,1}的存储寿命。由于系统的对称性,理论上左旋圆偏光与右旋圆偏光的自旋波随时间变化的存储效率是一致的。

我们在实验中的存储介质是磁光阱(MOT)俘获得到的⁸⁷Rb冷原子团,在磁光阱中,冷却光由一台外腔反馈半导体激光器 DL100 经过 BoosTa(德国 Topica)放大后耦合到单模保偏光纤,然后分为六束,每束光功率为 15 mW,光斑直径为 30 mm,锁定在跃迁 5S_{1/2}, F=2 → 5P_{3/2}, F'=3 负失谐 24.5 MHz 处,再泵浦光由另一台激

光器 DL100 提供,锁定在 5S_{1/2}, F=1 → 5P_{3/2}, F'=1 的共振跃迁线上,功率为 15 mW,俘获磁场由一对矩形反向亥姆霍兹线圈提供,其长宽比为 2.3 : 1。线圈 25 匝,电流为 25.8 A,这样,反向亥姆霍兹磁场短轴方向梯度为 10 G/cm,长轴方向梯度为 2.5 G/cm。在该 MOT 系统下我们俘获得到了一个 4 * 4 * 8 mm 的雪茄形原子团,原子数为 10¹⁰个,光学厚度为 7,温度约为 250 μk。

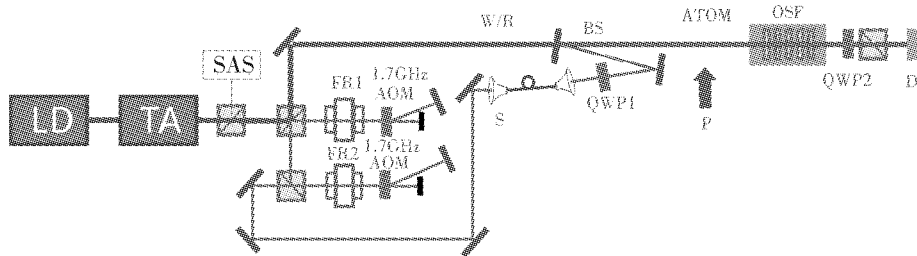


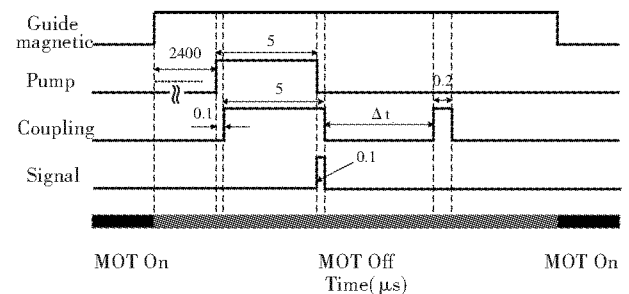
Fig. 2 Experimental setup, S: Signal pulse; W/R: Coupling light; FR1, FR2:

Faraday rotator; P: linear pump light; OSF: Optical spectral filters; D: C5331 detector.

图 2 实验装置图, S: 信号光 (Signal); W/R: 耦合光 (Coupling); FR1, FR2: 法拉第旋转器; P: 线偏泵浦光; OSF: 滤波系统 (Optical spectral filters); D: C5331 探测器。

实验光路如上图 2 所示,信号光和耦合光由同一台 Topica 激光器提供,其频率锁定在 5S_{1/2}, F=2 → 5P_{1/2}, F'=1, 激光经过 BoosTa(德国 Topica)放大后,首先通过一个棱镜 PBS 分出一小部分光进入饱和吸收装置(SAS)用于激光器的锁定,另一束光再次经过一个棱镜 PBS 分成两束光,一束光用双次通过两个 1.7 GHz 声光调制器的方法移频 6.8 GHz 到原子的共振吸收线 5S_{1/2}, F=1 → 5P_{1/2}, F'=1 处,作为信号光 (Signal),功率为 16 μw,光斑直径 1 mm。另一束作为耦合光,功率为 12 mW,光斑直径为 4 mm。信号光和耦合光的频率差为 ω_{cb},信号光经过 λ/4 (QWP1)与耦合光经耦合镜后重合,并一起沿导向磁场方向注入原子团中(耦合镜 BS, S1: T=20%, S2: AR coating),泵浦光由另一台激光器提供,其频率锁定在 |5S_{1/2}, F=1, m=0⟩ ↔ |5P_{3/2}, F'=0, m=0⟩ 的共振跃迁处,沿如图所示方向作用于原子,线偏振的泵浦光 P 功率 1 mW,光斑直径为 20 mm。释放出的光信号经过一组标准具

组成的滤波系统 (Optical spectral filters),该滤波系统由 5 个分别控温的厚 7.5 mm 两面镀有 90% 反射率的标准具组成,将混入信号光中的耦合光滤掉后,再经过 λ/4 (QWP2)和 PBS 后进入 C5331 探测器进行探测。



From top to bottom are: guide magnetic field; pump field; pump field; coupling field; signal field; MOT

Fig. 3 The sequence control signal

自上往下分别为导向磁场、泵浦光、耦合光、信号光、磁光阱

图 3 进行光存储实验时的时序

2 实验结果

实验中用到的时序控制图如图 3 所示。实验

周期为 100 ms, 前 91.5 ms 用于制备冷原子团, 后面 8.5 ms 用于做存储和释放实验。首先将冷却光、再泵浦光和反向亥姆霍兹线圈持续开启 91.5 ms 来冷却俘获原子团。然后关断再泵浦光和反向亥姆霍兹线圈, 导向磁场开启。2.4 ms 后开启泵浦光(脉宽为 $5 \mu\text{s}$)将基态上的原子制备到 $5S_{1/2}, F=1, m=-1, m=1$ 态上, 开启泵浦光

100 ns 后开启耦合光(脉宽为 $5 \mu\text{s}$), 然后关断泵浦光, 等待 100 ns 后关断耦合光。信号光脉冲(脉宽为 100 ns)在写光开启 $4.9 \mu\text{s}$ 后注入, 当信号光脉冲绝大部分进入原子中后, 通过 EIT 动力学过程(快速关断耦合光)将其存储在冷原子系综中。延迟 Δt 时间后, 打开耦合光(脉宽为 200 ns), 读出信号。

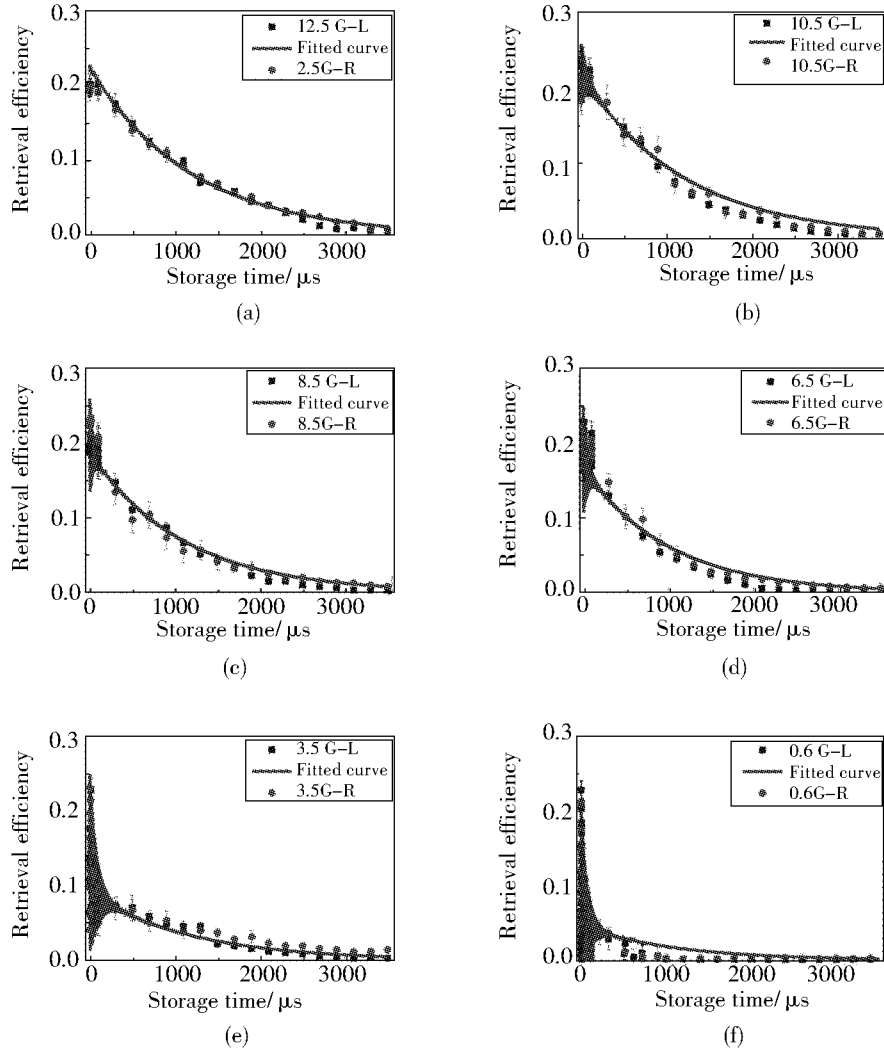


Fig. 4 Retrieval efficiency as the function of the storage time Δt . (a), (b), (c), (d), (e) and (f) correspond to the measured data for the Guide magnetic field strength $B_0 = 12.5 \text{ G}$, $B_0 = 10.5 \text{ G}$, $B_0 = 8.5 \text{ G}$, $B_0 = 6.5 \text{ G}$, $B_0 = 3.5 \text{ G}$, $B_0 = 0.6 \text{ G}$, respectively, square dots and circle dots are the measured results for the left and right circularly polarized signal light fields, respectively. Solid lines (a), (b), (c), (d), (e) and (f) are the fittings based on (1). The fitting parameters $\tau_{-1,1} = 1200 \mu\text{s}$, $\tau_{-1,-1} = 50 \mu\text{s}$.

图 4 导向磁场强度分别为 12.5 G、10.5 G、8.5 G、6.5 G、3.5 G、0.6 G 的情况下, 存储效率随时间的变化曲线。图中方点和圆点分别是左旋和右旋信号光, 实线为基于方程(1)的拟合曲线。拟合参数

$$\tau_{-1,1} = 1200 \mu\text{s}, \tau_{-1,-1} = 50 \mu\text{s}.$$

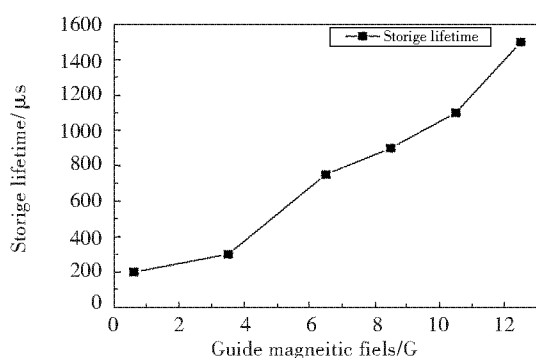


Fig. 5 Storage lifetime as the function of the Guide magnetic field strength

图 5 存储寿命随导向磁场的变化曲线

导向磁场强度增强,磁敏感自旋波的存储效率逐渐降低,其存储权重逐渐减小,因此,为了研究磁敏感自旋波对存储寿命的影响,在最佳磁场条件下获得较高的存储寿命,我们在光与原子相互作用区域施加了一个沿信号光传播方向的导向磁场,分别对导向磁场大小为 12.5 G、10.5 G、8.5 G、6.5 G、3.5 G、0.6 G 时的存储寿命进行测量。

我们分别对左旋圆偏和右旋圆偏的信号光进行了存储和释放实验。图 4 中 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 图分别是导向磁场强度分别为 12.5 G、10.5 G、8.5 G、6.5 G、3.5 G、0.6 G 时存储效率随存储时间的变化曲线。图中实线为基于方程(1)的拟合曲线。在磁场强度分别为 0.6 G、3.5 G、6.5 G、8.5 G、10.5 G、12.5 G 时,拟合参数 P1 分别对应为 0.48、0.6、0.82、0.92、0.99; P2 分别对应为 0.52、0.4、0.18、0.15、0.08、

0.01。对应的存储寿命分别为 200 μs 、300 μs 、750 μs 、900 μs 、1100 μs 、1500 μs (如图 5 所示)。可以看出,随着导向磁场增大,存储权重 P1 不断增大,存储权重 P2 不断减小。由于磁敏感自旋波和磁不敏感自旋波这两个自旋波的进动周期不相同,所以两个自旋波之间存在干涉因而呈现周期性的抖动。从图 4 中可以看出,随着导向磁场增大,磁敏感自旋波的存储权重减小,抖动幅度也明显减小,存储寿命加长。由上图的结果我们可以得出,随着导向磁场的加大,磁敏感自旋波的 EIT 三能级系统双光子失谐 Δ 逐渐增大,磁敏感自旋波的存储效率降低,存储权重逐渐减小,逐渐减小了磁敏感自旋波对存储寿命的影响,存储寿命逐渐增大。当磁场为 12.5 G 时,存储寿命达到了 1.5 ms。

3 小结

本文研究了两正交偏振光存储寿命与导向磁场之间的依赖关系,实验结果表明:随着导向磁场的加大,磁敏感自旋波的 EIT 三能级系统双光子失谐 Δ 逐渐增大,磁敏感自旋波存储效率降低,其存储权重逐渐减小,逐渐减小了磁敏感自旋波对存储寿命的影响,存储寿命逐渐增大。当磁场为 12.5 G 时,存储寿命达到了 1.5 ms。该实验结果对下一步实现纠缠光子对的长寿命存储提供了一些实验基础。

参考文献:

- [1] Chen Z B, Zhao B, Chen Y A, *et al.* Fault-tolerant quantum repeater with atomic ensembles and linear optics[J]. *Phys Rev A*, 2007, **76**:022329.
- [2] Lvovsky A I, Sanders B C, Tittel W. Optical Quantum Memory[J]. *Nat. Photonics*, 2009, **3**:706-714.
- [3] Simon C, De H, Riedmatten, M, Afzelius, *et al.* Quantum Repeaters with Photon Pair Sources and Multimode Memories [J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **98**:190503.
- [4] Sangouard N, Simon C, De H, Riedmatten, *et al.* Quantum Repeaters Based on Atomic Ensembles and Linear Optics[J]. *Rev Mod Phys*, 2011, **83**:33-70.
- [5] Sangouard N, Simon C, Zhao B, *et al.* Robust and Efficient Quantum Repeaters with Atomic Ensembles and Linear Optics[J]. *Phys Rev A*, 2008, **77**:062301.
- [6] 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.
- [7] Sangouard N, Simon C, Mina'ri J, et al. Long-distance Entanglement Distribution with Single-photon Sources[J]. *Phys Rev A*, 2007, **76**:050301(R).
- [8] Xiao M, Li Y Q, Jin S Z, et al. Measurement of Dispersive Properties of Electromagnetically Induced Transparency in Rubidium Atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **74**:666-669.
- [9] Banacloche J G, Li Y Q, Jin S Z, et al. Electromagnetically Induced Transparency in Ladder-type Inhomogeneously Broadened Media: Theory and Experiment[J]. *Phys Rev A*, 1995, **51**:576-584.
- [10] Bollinger K J, Imamolu A, Harris S E. Observation of Electromagnetically Induced Transparency[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **66**:2593-2596.
- [11] Haneliere T, Matsukevich D N, Jenkins S D, et al. Storage and Retrieval of Single Photons Transmitted Between Remote Quantum Memories[J]. *Nature*, 2005, **438**:833-836.
- [12] 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.
- [13] Lettner M, Mücke M, Riedl S, Vo C, Hahn C, Baur S, et al. Remote Entanglement between a Single Atom and a Bose-Einstein Condensate[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, **106**:210503.
- [14] Xu Zhong-xiao, Wu Yue-long, Tian Long, et al. Long Lifetime and High-Fidelity Quantum Memory of Photonic Polarization Qubit by Lifting Zeeman Degeneracy[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **111**:240503.

The Research of Relationship between Storage Lifetime of Two Orthogonal Polarization and Guide Magnetic Field

LI Ping, XU Zhong-xiao, CHEN Li-rong, WEN Ya-fei,
ZENG Wei-qing, 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: Placed in different strengths of magnetic field, the storage and release of two orthogonally polarized optical signals in ^{87}Rb cold atoms were studied on the basis of the electromagnetically induced transparency (EIT) dynamics. It was showed that, when the Guide magnetic field increases, the magnetic sensitive spin wave on storage lifetime constantly decreases and the influence of storage lifetime increases gradually. As the magnetic field rises to 12.5 G, the storage life time reaches to 1.5 ms.

Key words: long lifetime storage; guide magnetic field; magnetic insensitive state; cold atomic ensemble