

文章编号: 1007-6654(2013)04-0340-06

冷原子 EIT 介质中光存储效率与再泵浦光强的关系

张志英, 武跃龙, 徐忠孝, 陈力荣, 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: 利用电磁感应透明效应(EIT)在⁸⁷Rb冷原子介质中进行了光学信号存储释放的实验研究。测量了信号光存储效率随冷却系统中再泵浦光功率的变化关系。结果表明:当再泵浦光从零开始增大时,存储效率随之增大而增大;再泵浦光功率超过一定强度时,存储效率开始降低。一个简单的分析说明了上述存储效率与再泵浦光强的关系。

关键词: 冷原子; 电磁感应透明; 光学厚度; 存储效率

中图分类号: O431

文献标识码: A

doi: 10.3788/ASQO20131904.0340

0 引言

量子存储是实现量子中继、进行远距离量子通讯的工具^[1-6]。高效率的量子存储对大规模线性光学量子计算和长距离量子通信具有重要的意义^[3,7]。光子传播速度快,是传递量子信息的理想载体。原子系综基态间的退相干速率小,具有长的寿命,可用来存储量子信息。通过 EIT 动力学过程,可以实现量子信息在光场和原子之间的可逆传递,完成量子信息的存储和释放。最近这一研究受到人们的关注。

近年来人们在理论和实验上对提高信号光存储效率的方法进行了深入研究^[8,9]。研究表明:通过增大原子介质光学厚度,或将原子介质置于光学腔内进行量子存储等方法可提高信号光的存储效率。实验和理论研究表明:高光学厚度的原子介质,有利于提高光子的存储效率^[10-12]。2013 年余怡德小组在原子介质光学厚度增大到 104

时,存储效率达到了 78%^[12]。存储效率不仅与光学厚度有关,还与存储系统中的其他参数如:信号光脉冲形状^[13], EIT 线宽以及耦合光强度^[14]等有关。

为了实现有效的光学存储,我们在⁸⁷Rb冷原子介质中研究了存储效率与再泵浦光光强的关系。结果表明:当再泵浦光低于一定的强度时,存储效率随再泵浦光强度增大而增大;当再泵浦光超过这一强度时,存储效率开始降低。我们对这一现象进行了简单的分析,分析结果将有助于在冷原子介质中获得高效率的存储。

1 基于 EIT 光存储的方法简介

图 1 为我们实验中采用的⁸⁷Rb原子能级结构图。原子被制备在 $5S_{1/2}, F=1, m=-1$ 态上。信号光为左旋偏振光,作用于 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow$

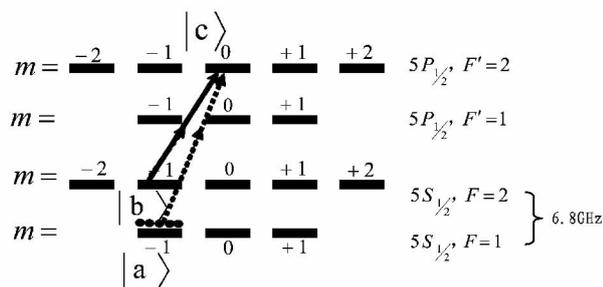
收稿日期: 2013-09-06

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; 11274211)

作者简介: 张志英(1988—), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 研究领域: 量子光学与量子通信的研究。E-mail: zhangzy229@126.com

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

$5P_{1/2}, F' = 2$ 共振跃迁线上。写光为左旋偏振光,作用于 $5S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 5P_{1/2}, F' = 2$ 共振跃迁线上。这样在图 1 能级中 $|a\rangle$ 、 $|b\rangle$ 、 $|c\rangle$ 间构成单一的 Λ 型 EIT 系统,图中 $|a\rangle = |5S_{1/2}, F = 1, m = -1\rangle$, $|b\rangle = |5S_{1/2}, F = 2, m = -1\rangle$, $|c\rangle = |5P_{1/2}, F' = 2, m = 0\rangle$ 。若写光与弱信号光同时作用在原子上且满足双光子共振时,基态 $|a\rangle$ 、 $|b\rangle$ 间形成相干叠加态,原子被俘获在基态上,很难向更高能级跃迁,形成“暗态”。信号光在共振处会产生一个透明窗口。若此时将写光绝热关断,信号光转化为原子自旋极化,实现光信号的存储。当一束读光被绝热开启时,存在原子自旋极化中的信号将以光脉冲的形式被释放出来。



其中点线为信号光,实线为写光(读光)

图 1 为 ^{87}Rb 原子光存储实验的能级图

Dotted line: Transition for the signal field;
Solid line: transition for the Write(Read) field

Fig. 1 Energy levels of the optical storage experiments in ^{87}Rb atoms

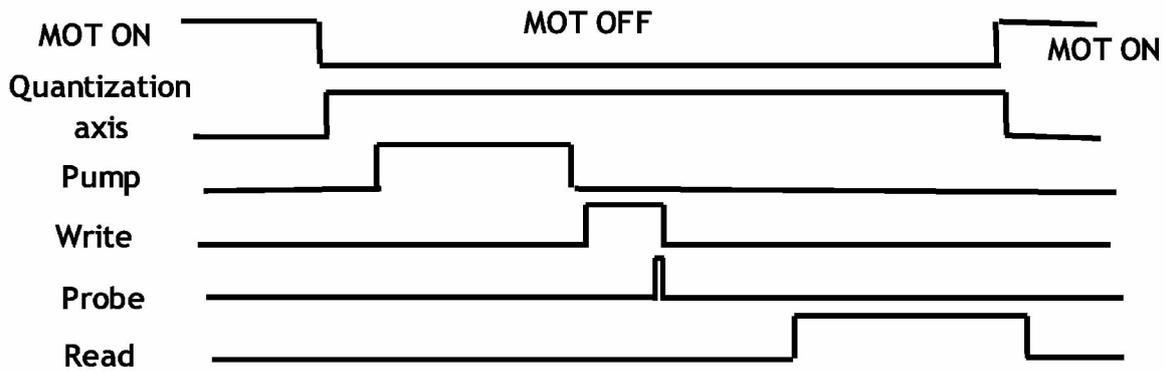
2 基于 EIT 光存储的实验装置

我们在 ^{87}Rb 冷原子介质中进行了光信号的存储释放研究。冷原子团采用磁光阱(MOT)系统俘获^[15]。冷却光由一台外腔反馈半导体激光器 DL100(德国 Toptica)经 BoosTa(德国 Toptica)放大后耦合到单模保偏光纤,然后分为六束,从六个方向注入 MOT 系统来冷却俘获原子。其中,BoosTa 注入功率为 35 mW,输出功率为 650 mW。俘获冷原子所需的再泵浦光由另一台 DL100 激光器提供。冷却光频率锁定在 $5S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 5P_{3/2}, F' = 3$ 共振跃迁线红失谐 24.5 MHz 处。再泵浦光频率锁定在 $5S_{1/2}, F = 1 \rightarrow$

$5P_{3/2}, F' = 1$ 共振跃迁线上。MOT 系统中的俘获磁场由一对反向亥姆霍兹线圈提供,磁场梯度为 6.5 G/cm。冷却光光斑直径为 40 mm,再泵浦光光斑直径也为 40 mm。俘获得到的冷原子团直径为 5 mm,原子数约为 10^9 个,温度约为 200 μK 。

钛宝石激光器输出的激光经偏振分束镜 PBS1 分成两束,一束光进入饱和吸收装置(SAS),用于钛宝石激光器的频率锁定(频率锁定在 $5S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 5P_{1/2}, F' = 2$ 共振跃迁线正失谐 200 MHz 处),另一束高功率的光通过 PBS2 再分为两束。一束光采用双次穿过的方法通过两个声光调制器 AOM1 和 AOM2(Brimrose,工作在 1.7 GHz)进行移频,其频率被移 6.8 GHz,从而与 ^{87}Rb 原子的 $5S_{1/2}, F = 1 \rightarrow 5P_{1/2}, F' = 2$ 跃迁线共振,我们将其作为信号光。信号光光斑直径为 1 mm,功率为 11 μW 。其经过声光调制器 AOM5 后入射到冷原子中。我们将 AOM1 的零级衍射光作为写光,其频率作用于 $5S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 5P_{1/2}, F' = 2$ 共振跃迁线上。写光光斑直径为 1 mm,功率为 1.3 mW。从 PBS2 分出的另一束光作为读光被耦合到单模保偏光纤,经光纤整形后通过两个模清洁剂过滤其非相干成分。读光光斑直径为 1 mm,功率为 18 mW。写光和读光分别通过 AOM3、4 后重合一起注入原子团中,与信号光的夹角为 0.5° 。一台 DL100 激光器产生的激光作为泵浦光(频率锁定在 $5S_{1/2}, F = 1 \rightarrow 5P_{1/2}, F' = 1$ 共振跃迁线正失谐 200 MHz 处),光斑直径为 7 mm,功率为 10 mW。泵浦光经过声光调制器 AOM6 后注入冷原子中,它与信号光的夹角也为 0.5° 。在光与原子作用区域施加一个 600 mG 的磁场来确定量子化轴,方向和信号光的传播方向重合。

我们用 NI 公司的 6551 板卡产生控制实验的时序(如图 3 所示)。实验的周期为 570 ms,前 520 ms 用于制备冷原子团,后面 50 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赫兹线圈持续开启 520 ms 来冷却俘获原子



自上往下分别为磁光阱,量子化轴磁场,泵浦光,写光,信号光,读光

图 3 进行光存储实验时的时序

From top to bottom are: MOT; quantization axis magnetic field; pump field; write field; signal field; read field

Fig. 3 The sequence control signals

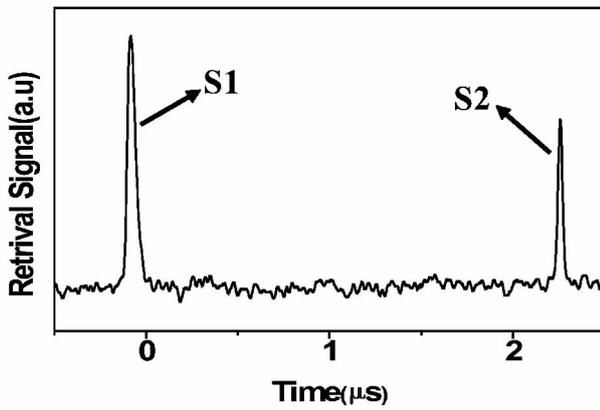


图 4 信号光存储释放信号

Fig. 4 Signal light storage and retrieval signal

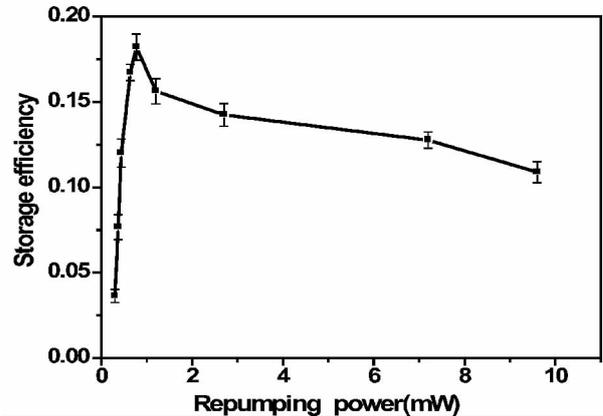


图 5 信号光存储效率随再泵浦光功率的变化曲线

Fig. 5 Signal light storage efficiency as a function of repumping power

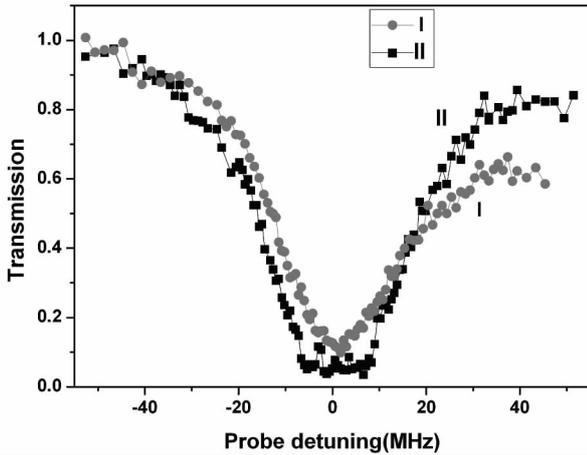
统中,当再泵浦光功率增大时,冷却的原子数增多,光学厚度随之增大,从而能够增大读出效率。我们测量了信号光存储效率随再泵浦光功率的变化。图 5 是实验结果。从图中可以看出:当再泵浦光功率从零开始增加时,存储效率随再泵浦光功率的增大而增大,当再泵浦光功率达到 $770 \mu\text{W}$ 时,存储效率达到最大 18%,然后随再泵浦光功率的增大,存储效率开始缓慢下降。当再泵浦光功率为 9.6 mW 时,存储效率为 10.8%。

为了说明上述存储效率随再泵浦光功率的变化关系,我们测量了两个典型的再泵浦光功率 ($640 \mu\text{W}$ 和 9.1 mW) 下的吸收信号。

当再泵浦光功率为 $640 \mu\text{W}$ 时,信号光的吸

收信号如图 6 中曲线 I 所示,通过拟合得到其相应的光学厚度为 2.2。当再泵浦光功率为 9.1 mW 时,信号光的吸收信号如图 6 中曲线 II 所示,通过拟合得到其相应的光学厚度为 7。我们看到再泵浦光功率为 9.1 mW 时冷原子的光学厚度大于再泵浦光功率为 $640 \mu\text{W}$ 时的光学厚度。图 7 中曲线 I 表示再泵浦光功率为 $640 \mu\text{W}$ 时的 EIT 信号,曲线 II 表示再泵浦光功率为 9.1 mW 时的 EIT 吸收信号。可以看到,在高的再泵浦光功率下,光学厚度较大,由此其相应的 EIT 窗口变差,从而使存储效率下降^[14]。在较高的光学厚度时,写光强度应相应地提高,才能使 EIT

窗口保持较好水平,同时不会使存储效率下降^[12]。



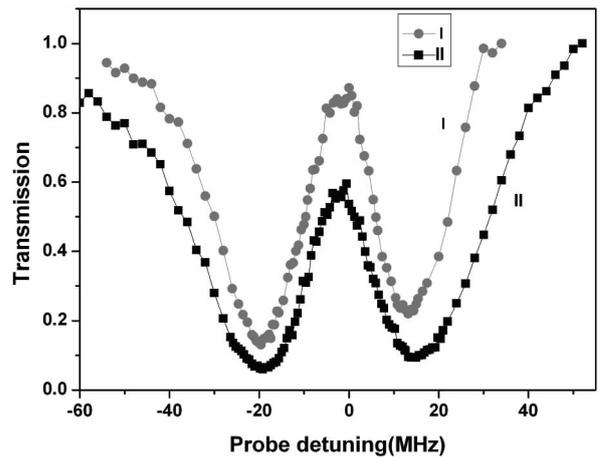
其中 I 和 II 对应的再泵浦光功率分别为 $640 \mu\text{W}$ 和 9.1 mW 。

图 6 不同再泵浦光功率下信号光的吸收
The repumping power of I and II are $640 \mu\text{W}$ and 9.1 mW .

Fig. 6 Transmission spectra of signal light passing through the cold atom cloud.

4 小结

我们在⁸⁷Rb冷原子介质中,通过 EIT 动力学过程实现了信号光的存储与释放。研究了信号



其中 I 和 II 对应的再泵浦光功率分别为 $640 \mu\text{W}$ 和 9.1 mW 。

图 7 不同再泵浦光功率下原子的 EIT 信号
The repumping power of I and II are $640 \mu\text{W}$ and 9.1 mW .

Fig. 7 The EIT-signal with Different repumping power

光存储效率随再泵浦光功率的变化关系。结果表明:高的再泵浦光功率,使原子介质的光学厚度增加,如果不提高控制光光强,EIT 窗口将变差,适当的增大控制光功率,将使 EIT 窗口保持较好水平,从而保持存储效率不降低。

参考文献:

[1] ALEXANDER LVOVSKY I, BARRY SANDERS C, WOLFGANG TITTE, *et al.* Optical Quantum Memory [J]. *Nature Photon*, 2009, **3**: 706.

[2] NICOLAS SANGOUARD, CHRISTOPH SIMON, HUGUES DE RIEDMATTEN, *et al.* Quantum Repeaters Based on Atomic Ensembles and Linear Optics [J]. *Rev Mod Phys*, 2011, **83**: 33-80.

[3] DUAN L-M, LJKIN M D, Cirac J I, *et al.* Long-distance Quantum Communication with Atomic Ensembles and Linear Optics [J]. *Nature*, 2001, **414**: 413.

[4] HOLGER SPECHT P, CHRISTIAN NÖLLEKE, ANDREAS REISERER, *et al.* A Single-atom Quantum Memory [J]. *Nature*, 2011, **473**: 190.

[5] HARUKA TANJI, SAIKAT GHOSH, JONATHAN SIMON, *et al.* Heralded Single-Magnon Quantum Memory for Photon Polarization States [J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **103**: 043601.

[6] ENGLAND D G, MICHELBERGER P S, CHAMPION T F M, *et al.* High-fidelity Polarization Storage in a Gigahertz Bandwidth Quantum Memory [J]. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2012, **45**: 124008.

[7] BAO Xiao-hui, ANDREAS REINGRUBER, PAN Jian-wei, *et al.* Efficient and Long-lived Quantum Memory with Cold Atoms Inside a Ring Cavity [J]. *Nature Physics*, 2012, **10**: 1038.

[8] LUKIN M D, IMAMOGLU A. Controlling Photons Using Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Nature*,

2001, **413**: 273-276.

- [9] LUKIN M D. Trapping and Manipulating Photon States in Atomic Ensembles [J]. *Rev Mod Phys*, 2003, **75**: 457-472.
- [10] ALEXEY GORSHKOV V, AXEL ANDRE, LUKIN M D, et al. Photon Storage in Λ -type Optically Dense Atomic Media. II. Free-space Model [J]. *Phys Rev A*, 2007, **76**: 033805-1-25.
- [11] ZHANG Shan-chao, ZHOU Shu-yu, DU Sheng-wang, et al. Optical Storage with Electromagnetically Induced Transparency in a Dense Cold Atomic Ensemble [J]. *Opt Lett*, 2011, **36**: 4530-4532.
- [12] YIHSIN CHEN, MENGJUNG LEE, ITE YU A, et al. Coherent Optical Memory with High Storage Efficiency and Large Fractional Delay [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **110**: 083601.
- [13] NATHANIEL PHILLIPS B, ALEXEY GORSHKOV V, IRINA NOVIKOVA. Optimal Light Storage in Atomic Vapor [J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**: 023801.
- [14] 李淑静, 赵兴波, 徐忠孝, 等. 冷原子系综中光存储效率与耦合光强的关系研究 [J]. 量子光学学报, 2010, **16**: 196.
- [15] 韩燕旭, 王波, 马杰, 等. 冷原子 EIT 介质的原子数目和温度的测量 [J]. 量子光学学报, 2007, **13**: 30.

The Relationship between Light Storage Efficiency and Repumping Intensity in Cold Atom Medium

ZHANG Zhi-ying, WU Yue-long, XU Zhong-xiao,
CHEN Li-rong, 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 electromagnetically induced transparency (EIT), we realized the optical signal storage and release in ^{87}Rb cold atom medium. We have got the curve of storage efficiency as a function of the repumping intensity in cooling system. Experimental results showed that: the storage efficiency increases with the repumping intensity, when it increases from zero; if the repumping intensity exceeds a certain intensity, the storage efficiency begins to decrease. A simple analysis interpreted the relationship between storage efficiency and the repumping intensity.

Key words: cold atoms; electromagnetically induced transparency; optical density; storage efficiency