

文章编号: 1007-6654(2012)01-0039-06 ①

## 双通道原子相干性转移效率与拉曼单光子失谐的关系研究

郑海燕, 徐忠孝, 刘海龙, 武跃龙, 李淑静, 王海<sup>†</sup>

(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:** 研究了原子相干性在双通道间的转移效率与拉曼单光子失谐的关系。在冷原子四能级 Tripod 型系统中, 首先利用 EIT 动力学过程将光信号存储在原子的一个记忆通道上。然后通过拉曼双光子过程, 我们进行了原子记忆在两个通道间相干转移的研究, 结果表明, 在一定的拉曼光强下, 原子相干性在双通道间的转移效率随着拉曼单光子失谐发生变化, 最大的转移效率可达到 94%。

**关键词:** 光存储; 拉曼双光子过程; 原子记忆相干转移

**中图分类号:** O431 **文献标识码:** A

原子相干效应是近年来量子光学领域的一个研究热点。电磁感应透明(EIT)<sup>[1]</sup>、相干布居俘获(CPT)<sup>[2]</sup>、拉曼双光子过程<sup>[3]</sup>、自发辐射控制、共振增强的非线性以及光量子存储都是基于原子相干效应<sup>[4]</sup>。而量子信息和量子计算则需要对原子相干性进行操控, 拉曼双光子是两个通道间相干性转移的一种有效手段。利用拉曼双光子过程就可以对原子记忆进行相干操控。

1999年, 哈佛大学的 Hau 等人在超冷 Na 原子 BEC 中, 利用 EIT 效应将光脉冲的群速度减慢至 17m/s<sup>[5]</sup>。随后, 他们在光减速的基础上, 实现了光场信息在原子系综中的存储与可控释放<sup>[6]</sup>。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<sup>[7]</sup>。拉曼双光子过程中原子记忆相干转移是在光存储的基础上进行的研究。本文中我们研究了拉曼单光子失谐对原子相干转移效率的影响。

我们在<sup>87</sup>Rb 冷原子团中, 通过光泵浦将原子制备到单一 zeeman 子能级上, 选择合适圆偏振的

探针光、写光, 利用 EIT 动力学过程, 将探针光存储到原子的一个记忆通道上, 通过拉曼双光子过程对基态的原子相干性进行转移, 使已经建立的原子记忆相干地被转移到另外一个记忆通道上, 再用读光将被转移的原子记忆信号释放出来, 对其进行测量。观察在一定的拉曼光强下, 原子记忆转移效率随拉曼单光子失谐的变化关系。

### 1 利用拉曼双光子过程对原子记忆相干转移的理论分析

图 1 是我们采用的能级结构。其中(a)是进行光存储的  $\Lambda$  型能级结构, 在实验中, 我们选择<sup>87</sup>Rb 原子 D1 线的  $5P_{1/2}$ ,  $F'=1$ ,  $m=0$  作为激发态,  $5S_{1/2}$ ,  $F=1$ ,  $m=\pm 1$  和  $5S_{1/2}$ ,  $F=2$ ,  $m=1$  作为基态, 首先通过光泵浦将原子布居数制备到态  $|b_{\uparrow}\rangle$  上。探针光和写光均为左旋圆偏振光, 分别作用在  $5S_{1/2}$ ,  $F=1$ ,  $m=1$  到  $5P_{1/2}$ ,  $F'=1$ ,  $m=0$  和  $5S_{1/2}$ ,  $F=2$ ,  $m=1$  到  $5P_{1/2}$ ,  $F'=1$ ,  $m=0$  的跃迁上, 这样形成一个典型的  $\Lambda$  型 EIT ( $|b_{\uparrow}\rangle$  -

① 收稿日期: 2011-11-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB923100); 高等学校博士学科点专项科研基金(20060108002); 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: 郑海燕(1986—), 女, 山西运城人, 在读硕士, 主要从事量子光学与量子信息的研究。E-mail: 200922607020@mail.sxu.cn

<sup>†</sup> 通讯作者: wanghai@sxu.edu.cn

$|e\rangle - |s\rangle$ )。我们在这个  $\Delta$  型结构中进行光存储, 将探针光存储到  $|b_\uparrow\rangle$  和  $|s\rangle$  两个基态的相干叠加态  $\rho_{b_\uparrow s}$  上。(b) 是通过拉曼双光子过程对原子布局数转移的示意图。左旋圆偏振拉曼光和右旋圆偏振拉曼光作用在相对于  $5S_{1/2}, F=1$  到  $5P_{1/2}, F'=1$  的正失谐  $\Delta$  处, 通过拉曼双光子过程, 原子布局数在态  $|b_\uparrow\rangle$  和态  $|b_\downarrow\rangle$  之间进行转移。同时原子相干性也在两个通道  $\rho_{b_\uparrow s}$  和  $\rho_{b_\downarrow s}$  之间进行转移。(c) 图描述对两个记忆通道的读出过程。

读光作用在  $5S_{1/2}, F=2, m=1$  到  $5P_{1/2}, F'=1, m=0$  的跃迁上, 如果态  $|b_\uparrow\rangle$  上存在原子布局数, 也就是说通道  $\rho_{b_\uparrow s}$  存在相干性, 这时读出的光信号为左旋圆偏; 如果态  $|b_\downarrow\rangle$  上存在原子布局数, 这时读出的光信号为右旋圆偏。我们通过对读出的左旋, 右旋光信号进行测量来确定相干性的转移效率。下面我们对双通道原子相干性转移(图(b))进行理论分析。

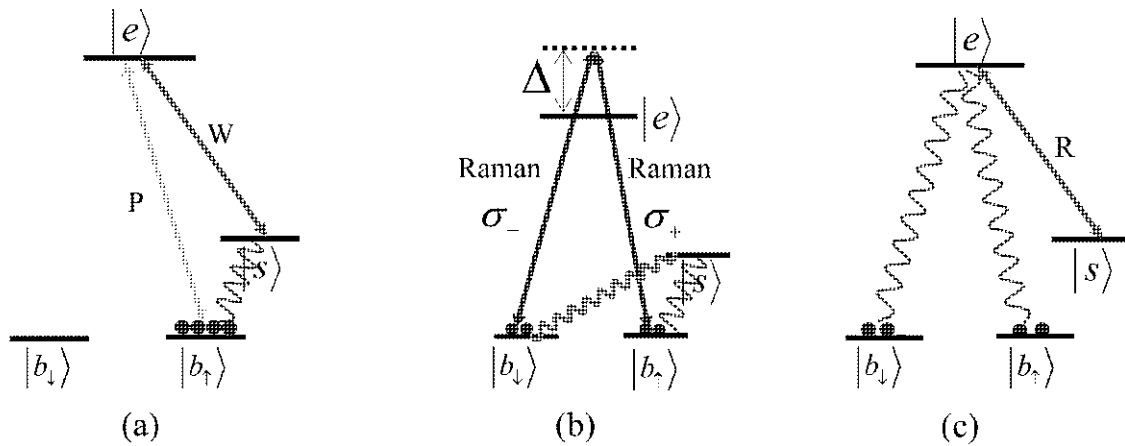


图 1 能级结构图

Fig. 1 Relevant energy levels in  $^{87}\text{Rb}$  D1 line

系统的哈密顿量  $H = H_0 + H_i$ , 其中  $H_0$  为本征态的哈密顿量,  $H_i$  代表系统的相互作用哈密顿量。

表达式分别为:

$$H_0 = \hbar\omega_{b_\downarrow} |b_\downarrow\rangle\langle b_\downarrow| + \hbar\omega_{b_\uparrow} |b_\uparrow\rangle\langle b_\uparrow| + \hbar\omega_e |e\rangle\langle e| \quad (1)$$

$$H_i = -(\vec{e}_- \cdot \vec{E}_- \cos\omega_- t + \vec{e}_+ \cdot \vec{E}_+ \cos\omega_+ t) \quad (2)$$

其中  $E_+, E_-$  分别代表左旋拉曼光, 右旋拉曼光的场强,  $\omega_+, \omega_-$  分别为左旋拉曼光, 右旋拉曼光的圆频率, 且在实验中  $E_+ = E_-, \omega_+ = \omega_-$ 。

原子系统的波函数可表示为:

$$|\Psi(t)\rangle = C_{b_\downarrow}(t) |b_\downarrow\rangle + C_{b_\uparrow}(t) |b_\uparrow\rangle + C_e(t) |e\rangle \quad (3)$$

其中  $C_{b_\downarrow}(t), C_{b_\uparrow}(t), C_e(t)$  分别表示态  $|b_\downarrow\rangle, |b_\uparrow\rangle, |e\rangle$  的几率幅。

利用薛定谔方程

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi_i\rangle = \hat{H} |\Psi_i\rangle \quad (4)$$

(3)式代入(4)式, 并通过旋波近似得:

$$\dot{C}_{b_\downarrow} = i\Omega_- C_e e^{-i\Delta t} \quad (5)$$

$$\dot{C}_{b_\uparrow} = i\Omega_+ C_e e^{-i\Delta t} \quad (6)$$

$$\dot{C}_e = i(\Omega_-^* C_{b_\downarrow} + \Omega_+^* C_{b_\uparrow}) e^{i\Delta t} \quad (7)$$

式中  $\Omega_+ = \frac{|\langle \wp | E_+ \rangle|}{2\hbar}, \Omega_- = \frac{|\langle \wp | E_- \rangle|}{2\hbar}$  分别表示左旋拉曼光, 右旋拉曼光的拉比频率。其中  $\langle \wp = e \langle b | x | e \rangle$ , 为拉曼光的偶极矩)。 $\Delta = \omega_+ - \omega_{b_\uparrow} = \omega_- - \omega_{b_\downarrow}$  表示拉曼光相对于激发态  $|e\rangle$  的失谐。 $\omega_{b_\uparrow}, \omega_{b_\downarrow}$  表示基态  $|b_\uparrow\rangle, |b_\downarrow\rangle$  与激发态  $|e\rangle$  之间的跃迁频率。

我们利用慢变近似

$$C_e \equiv e^{-i\Delta t} C'_e \quad (8)$$

对(8)式求导可得:

$$\dot{C}_e = e^{-i\Delta t} (\dot{C}'_e - i\Delta C'_e) \quad (9)$$

令  $\Delta C'_e \gg \dot{C}'_e$ , (9)式可以写为

$$C_e \approx \frac{i\dot{C}_e}{\Delta} \quad (10)$$

将(10)代入上面(7)式,得:

$$C_e = -\frac{1}{\Delta}(\Omega_- C_{b\downarrow} + \Omega_+ C_{b\uparrow}) \quad (11)$$

将(11)式代入(5)(6)式,得:

$$\dot{C}_{b\downarrow} = -i \frac{|\Omega_-|^2}{\Delta} C_{b\downarrow} - i \frac{\Omega_+ \cdot \Omega_-^*}{\Delta} C_{b\uparrow} \quad (12)$$

$$\dot{C}_{b\uparrow} = -i \frac{|\Omega_+|^2}{\Delta} C_{b\uparrow} - i \frac{\Omega_-^* \cdot \Omega_-}{\Delta} C_{b\downarrow} \quad (13)$$

解上述方程组得:

$$C_{b\downarrow}(t) = C_{b\downarrow}(0) \cos |\Omega| - i \frac{\Omega}{|\Omega|} C_{b\uparrow}(0) \sin |\Omega| \quad (14)$$

$$C_{b\uparrow}(t) = C_{b\uparrow}(0) \cos |\Omega| - i \frac{\Omega}{|\Omega|} C_{b\downarrow}(0) \sin |\Omega| \quad (15)$$

其中:  $\Omega = \frac{\Omega_+ \cdot \Omega_-^*}{\Delta}$ , 表示双光子拉曼过程的有效拉比频率。

代入实验初始条件  $|C_{b\downarrow}(0)|^2 = 0$ ,  $|C_{b\uparrow}(0)|^2 = 1$ , 得下面结果:

$$C_{b\downarrow}(t) = -i \frac{\Omega}{|\Omega|} \sin |\Omega| \quad (16)$$

$$C_{b\uparrow}(t) = \cos |\Omega| \quad (17)$$

两个通道的原子相干性可分别表示为:

$$\rho_{b\downarrow} = C_s^* \cdot C_{b\downarrow} \quad (18)$$

$$\rho_{b\uparrow} = C_s^* \cdot C_{b\uparrow} \quad (19)$$

由上式可知,原子记忆在两个通道上的比例取决于态  $|b_\downarrow\rangle$ ,  $|b_\uparrow\rangle$  上的原子布局数分布。所以我们可以通过原子布局数的转移来实现原子记忆在两个通道间的转移。

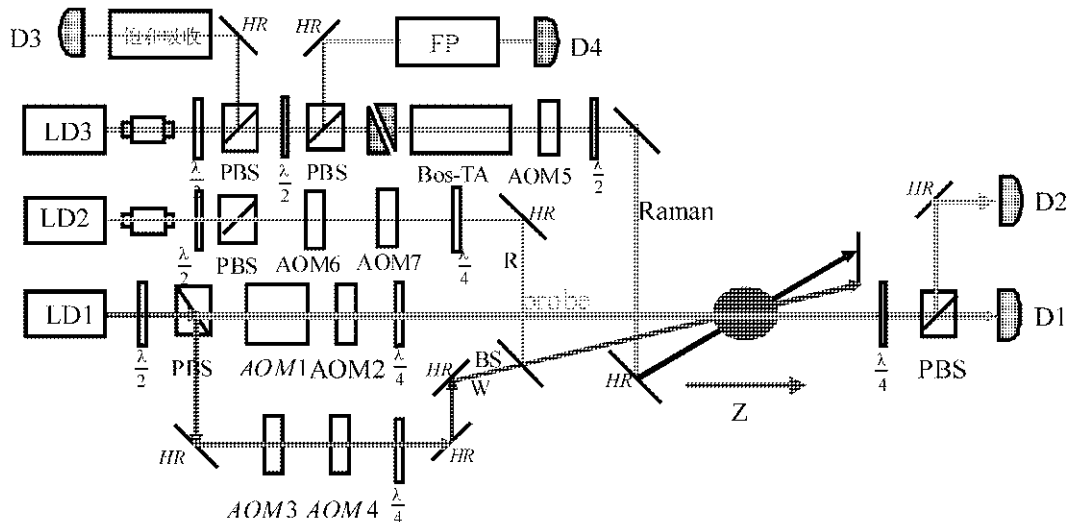
## 2 实验装置及结果

实验中我们采用<sup>87</sup>Rb冷原子为介质<sup>[8]</sup>。冷原子温度约为200 μK,原子光学厚度约1.5<sup>[9]</sup>。

利用拉曼双光子过程进行原子相干性转移的实验装置如图2所示。光栅反馈半导体激光器LD1发出的光经λ/2波片和偏振分束棱镜PBS后分成两束。其中一束经6.8 GHz声光频移系统,作为探针光,另外一束作为写光,这样探针光和写光频率相差6.8 GHz,满足光存储的要求。声光调制器AOM2用于产生探针光脉冲,声

光调制器AOM3和AOM4用于控制写光的开关。两个λ/4波片使探针光和写光的偏振变为左旋圆偏振光。激光器LD2发出的光作为读光,经过用于控制读光开关的声光调制器AOM6和AOM7后,通过λ/4波片使其偏振变为左旋圆偏振光,再经过BS后与写光重合。并且探针光与写光以小角度(<1°)在冷原子团中重合。通过关断和开启写光和读光脉冲,实现探针光脉冲的存储和释放。激光器LD3发出的光经λ/2波片和偏振分束棱镜PBS后分成两束。其中一束为饱和吸收谱,作为频率锁定的标准。另一束光再经λ/2波片和偏振分束棱镜PBS后分成两束,其中一束通过F-P腔,用于激光频率失谐锁定,另一束经由整形棱镜对光斑进行整形后注入BoosTA中进行放大,放大后的拉曼光通过单模保偏光纤对光斑进行整形输出,然后经过用于产生拉曼光脉冲的声光调制器AOM5后,以小角度(~1°)与探针光在冷原子团中重合。经过原子团后,将读光,写光与拉曼光用挡光片挡住,同时将探针光的存储释放信号经过λ/4波片和偏振分束棱镜PBS后分成两束,一束用探测器D1探测,另一束由探测器D2探测。当探针光的存储释放信号为左旋圆偏振光时,探测器D1探测到信号;当探针光的存储释放信号为右旋圆偏振光时,探测器D2探测到信号。实验中,我们在光与原子作用区域施加了一个275 mG的磁场来确定量子化轴,方向沿着探针光的传播方向,保证探针光,写光和读光以圆偏振方式与原子作用,同时保证线偏振拉曼光在量子化轴作用下分成左旋、右旋圆偏振光与原子相互作用。激光器LD1,LD2用饱和吸收进行锁频,探针光与跃迁 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=1$ 共振作用,其功率为17 μW。读光和写光都与跃迁 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=1$ 共振作用,读光功率20 mW,写光功率1 mW。拉曼光与跃迁 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=1$ 正失谐Δ处作用,拉曼光脉冲持续时间为1.9 μs。

图3是进行原子相干性转移的时序控制图。每个控制周期为1 s,其中大部分时间用来俘获和冷却原子,只有1 ms进行光信号的存储和释放。首先将原子俘获到超精细能级 $5S_{1/2}, F=2$ 上,然后关闭MOT系统,同时开启量子化轴磁

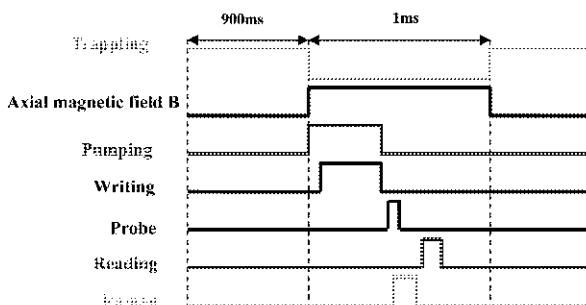


LD:半导体激光器; HR:45°高反镜; PBS:偏振分束棱镜;  $\lambda/2$ :二分之一波片;  $\lambda/4$ :四分之一波片; AOM1:6.8 GHz声光频移系统; AOM2:80MHz声光调制器; AOM3, AOM4, AOM5, AOM6 AOM7:200MHz声光调制器; BS:光分束镜; FP:法布里-珀罗干涉仪; D1, D2:DC-125MHZ低噪声探测器, D3, D4 光电探测器

图2 实验装置图

DL100; diode laser; HR; 45° high reflectivity mirror; PBS; polarizing beam splitter;  $\lambda/2$ ; half-wave plate;  $\lambda/4$ ; quarter-wave plate; AOM1; 6.8GHz acousto-optical frequency shift system; AOM2; 80MHz acousto-optical modulator; AOM3, AOM4, AOM5, AOM6 and AOM7; 200MHz acousto-optical modulators; BS; beam splitter; FP; C, Fabry, A, Perot interferometer D1, D2; DC-125MHZ low noise photodetector; D3, D4; photo detectors

Fig. 2 Experimental setup



自上往下分别为: 冷却光, 磁场, 再泵浦光, 写光, 探针光, 读光, 拉曼光。

图3 进行原子相干转移的时序控制信号

From top to bottom are: cooling beam, MOT B-field, repumping beam, coupling field, probe field and Raman field.

Fig. 3 The sequence control signals

场。300  $\mu$ s后打开写光将原子制备到能级  $5S_{1/2}$ ,  $F=1$  上, 399  $\mu$ s后打开探针光脉冲, 探针光脉冲为近高斯型, 半高宽度为 200 ns, 当探针光脉冲完全存储到冷原子系综中, 关断探针光脉冲。存储 400 ns后, 打开拉曼光脉冲, 将已存储的原子记忆进行相干转移, 拉曼光脉冲为高斯型。经过 200 ns后, 打开读光, 对原子中两个通道的记忆信号进行读出。利用图3的时序控制, 我们观察

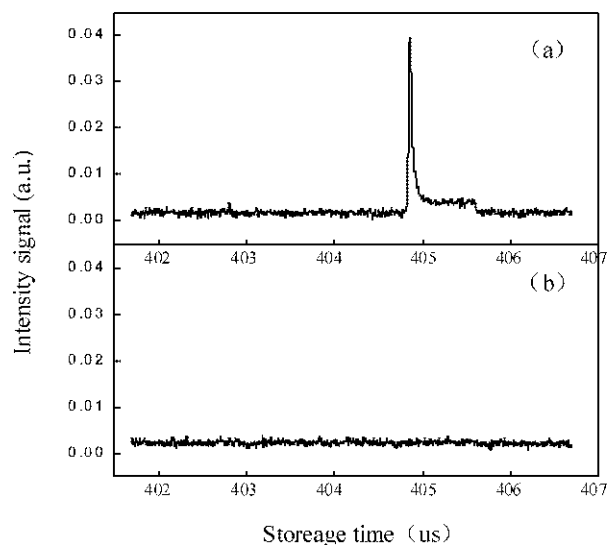


图4 实验测量得到光脉冲释放信号

Fig. 4 The experimental measured signal

存储信号在没有拉曼光作用下的释放信号, 图4(a)表示的是探测器 D1 读出的探针光存储释放信号, 图4(b)表示的是探测器 D2 读出的探针光存储释放信号。从图中可以看出, 在没有拉曼光时, 只有探测器 D1 读出信号, 说明这时原子相干性完全在  $\rho_{b_1, s}$  通道上。

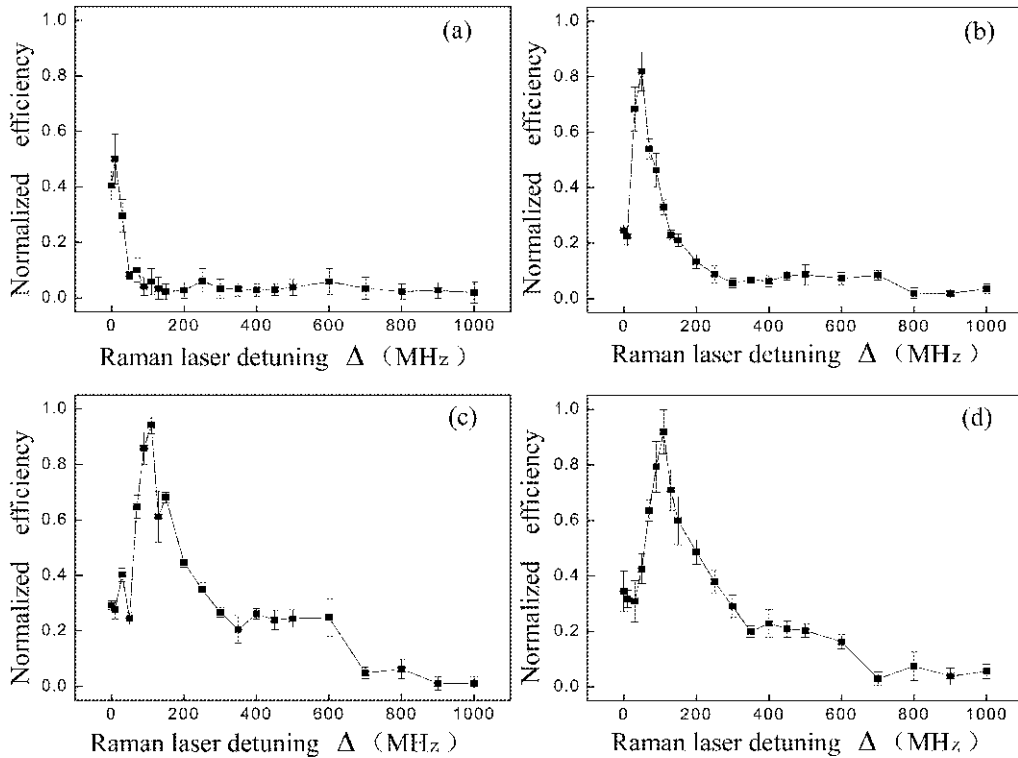


图 5 原子记忆相干转移效率随拉曼单光子失谐的变化关系

Fig. 5 Coherent atomic memory of transfer efficiency as a functions of Raman detuning

接着我们观察了在不同的拉曼光强下,原子记忆相干转移效率随拉曼单光子失谐的变化。原子相干性转移效率为探测器 D2 探测到的探针光存储释放信号面积与无拉曼光时探测器 D1 探测到探针光存储释放信号面积的比值。图 5(a)-(d)分别是拉曼光强为 10 mW, 50 mW, 83 mW, 96 mW 时的原子记忆转移效率随着拉曼单光子失谐的变化情况。从图中可以看出,当拉曼光光强为 10 mW 时,在失谐为 +10 MHz 时,原子相干性转移效率最大达 46.4%,失谐 100 MHz 以后,拉曼双光子转移原子相干性效率趋于零。当拉曼光光强为 50 mW 时,在失谐为 +50 MHz 时,原子记忆相干转移效率最大达 85.8%,失谐 800 MHz 以后,拉曼双光子转移原子相干性效率趋于零。当拉曼光光强为 83 mW 时,在失谐为 +90 MHz 时,原子相干性转移效率最大达 94.1%,失谐 700 MHz 以后,拉曼双光子转移原子相干性效率趋于零。拉曼光光强为 96 mW 时,在失谐为 +110 MHz 时,原子相干性转移效率最大达 93.21%。

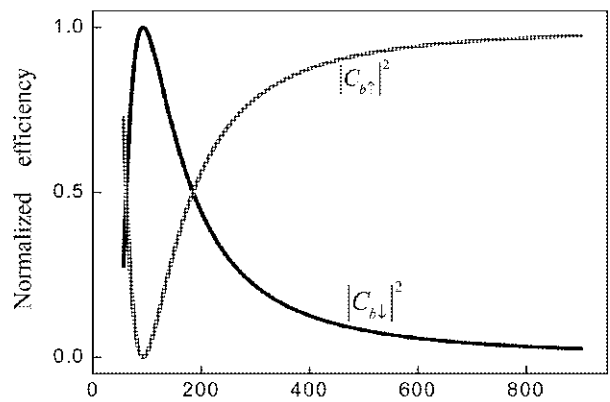


图 6 原子布局数转移效率随失谐变化的理论曲线

Fig. 6 The Curves of transfer efficiency as a functions of Raman detuning

### 3 分析和讨论

通过(16)和(17)式我们可以得到  $|C_{b\downarrow}|^2$ ,  $|C_{b\uparrow}|^2$  的变化曲线,如图 6 所示。曲线参数  $\Omega_+ \cdot \Omega_- = 76 \text{ MHz}$ , 失谐变化范围为  $30 \text{ MHz} \leq \Delta \leq 950 \text{ MHz}$ 。

从图中可以看出,曲线  $|C_{b\downarrow}|^2$  和  $|C_{b\uparrow}|^2$  的变化趋势相反,并且在合适的拉曼单光子失谐情况下,曲线  $|C_{b\downarrow}|^2$  的原子布局数转移最大。我们

选择合适参数情况下,失谐+90 MHz时,原子相干性转移效率最大,这与实验结果基本吻合。

从图中可以看出,理论转移效率最大达100%,在实验中,由于各种条件限制,我们测得的转移效率最大为94%。

#### 4 小结

在冷原子四能级 Tripod 型系统中,我们利用

EIT 动力学过程将光信号存储在基态的相干叠加态上,然后再通过拉曼双光子过程,实现原子布居数的转移,同时使已经建立的原子记忆被相干地转移到另外一个记忆通道上。通过对双通道原子相干性转移效率与拉曼单光子失谐的关系研究,我们发现,在合适的光强和失谐情况下,原子相干性转移效率最大为94%。

#### 参考文献:

- [1] LENE VESTERGARRD HAU, HARRIS S E, ZACHARY DUTTON, *et al.* Light Speed Reduction to 17 Metres Per Second in an Ultracold Atomic Gas [J]. *Nature*, 1999, **397**: 594.
- [2] ARGARWAL G S, NAYAK N. Effects of Long-lived incoherences on Coherent Population Trapping [J]. *J Phys B*, 1986, **19**: 3375.
- [3] LI Shu-jing, WANG Hai. Coherent Manipulation of Spin-wave Vector for Polarization of Photons in an Atomic Ensemble [J]. *Phys Rev A*, 2011, **84**: 043430.
- [4] FLEISCHHAUER M, LUKIN M D. Dark-state Polaritons in Electromagnetically induced transparency [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 5094.
- [5] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, *et al.* Light Speed Reduction to 17 Metres Per Second in an Ultracold Atomic Gas [J]. *Nature*, 1999, **397**: 594.
- [6] LIU C, DUTTON Z, BEHROOZI C H, *et al.* Observation of Coherent Optical Information Storage in an Atomic Medium Using Halted Light Pulses [J]. *Nature*, 2001, **409**: 490.
- [7] 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.
- [8] 赵兴波, 徐忠孝, 张利军, 等.  $^{87}\text{Rb}$  冷原子 EIT 介质中光学信号存储与释放的实验研究 [J]. *量子光学学报*, 2011, **16**: 196-201.
- [9] 李淑静, 赵兴波, 徐忠孝, 等. 冷原子系统中光存储效率与耦合光强的关系研究 [J]. *量子光学学报*, 2011, **16**: 189-195.

## The Investigation of Relationship between the Efficiency of Coherence Transfer in Two-channel and Single-photon Detuning of Raman Laser

ZHENG Hai-yan, XU Zhong-xiao, LIU Hai-long, WU Yue-long, 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:** We studies the relationship between the efficiency of coherence transfer in two-channel and single-photon detuning of Raman laser. In a four-level atomic system, we store a coherent optical signal in an initial channel by using EIT technology. Then we implement coherence transfer between two memory channels, by Raman two-photon transition. The maximum efficiency of coherence transfer along with the function of the frequency detuning of Raman lasers is about 94%.

**Key words:** light storage; Raman two-photon transition; efficiency of coherence transfer