

# 冷铷原子样品中高效静态光信号的生成与调制

张岩<sup>1\*</sup>, 张晓航<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 崔淬砺<sup>1</sup>, 国秀珍<sup>1,2</sup>, 吴金辉<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012; 2. 长春理工大学 光电信息学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 为了提高光信息处理元件的性能, 实现高效率光信号的静止与存储, 本文建立了由双向耦合场耦合的冷铷(<sup>87</sup>Rb)原子的四能级双 $\Lambda$ 型能级机制, 并对此机制在生成静态光信号时要求的高效性、持续时间, 控制耦合场所需的操作条件以及对信号场强度的相位调制等进行了研究。首先, 选取四能级双 $\Lambda$ 型<sup>87</sup>Rb冷原子精细能级, 用一对反向传播的行波激光场对能级进行近共振耦合, 并沿耦合场方向输入一个正向弱光信号进行探测。接着, 通过适当的绝热开启、关闭耦合场, 存储光信号和生成高保真度静态光信号。然后, 通过选取<sup>87</sup>Rb原子的不同精细能级结构, 得出实现静态光所需满足的必要条件。最后, 采用相位调制法对光信号进行处理。结果表明: 生成的静态光信号具有高效性, 过程持续时间约为80  $\mu$ s; 相位调制法可以周期调节静态光脉冲的强度。在此机制下生成的静态光信号满足高效性、易于全光调节和长时效性等要求。

**关键词:** 电磁感应光透明; <sup>87</sup>Rb原子; 四能级系统; 静态光脉冲; 动态光存储

**中图分类号:** O431.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120502.0143

## Generation and modulation of high efficiency stationary optical signals in cold <sup>87</sup>Rb atomic samples

ZHANG Yan<sup>1\*</sup>, ZHANG Xiao-hang<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, CUI Cui-li<sup>1</sup>, GUO Xiu-zhen<sup>1,2</sup>, WU Jin-hui<sup>1,2</sup>

(1. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: yanzhangc@yahoo.cn

**Abstract:** In order to improve the performance of optical information processing components and to achieve high efficiency optical signals for static storage, a four-level double-Lambda cold <sup>87</sup>Rb atomic system driven by two counter-propagating travelling wave fields is established, and the necessary Stationary Pulse Light (SLP) conditions of controlling coupling fields and phase modulation ways to control probe intensity are studied. First, the four-level double-Lambda cold <sup>87</sup>Rb atomic energy level driven by two counter-propagating travelling wave fields is selected, and the forward resonance coupling field is switched on to guide only one forward inci-

dent signal into samples for detection. Then, the optical signals are stored and efficient SLPs are generated through switching on and turning off two coupling fields. The necessary conditions to generate efficient SLPs are obtained according to selecting different fine structures of energy level. Finally, the phase modulation method of control stationary light intensity is attained. The results indicate that the system can generate efficient SLPs with continue time nearly 80  $\mu\text{s}$  and the phase modulation can adjust the stationary light intensity periodically. Obtained SLPs satisfy the optical signal processing requirements for higher efficiency, higher fidelity, all-optical control and long timeliness.

**Key words:** Electromagnetically Induced Transparency (EIT);  $^{87}\text{Rb}$  atom; four-level system; Stationary Pulse Lights (SPLs); dynamic light storage

## 1 引言

随着全球信息量的爆炸式增长,传统的以半导体电子学为基础的信息技术已无法满足人们日益增长的信息需求。为了提高信息处理与传输系统的性能,人们开创了全新的光子学信息技术<sup>[1]</sup>。但是光子在非真空中传输容易被粒子散射或吸收,且随着传输距离的增加,其损耗也会愈加明显,对光进行控制和定位也颇有难度。虽然现在已经可以通过光纤载波来实现信息的高速传递,但若研制出功能强大的集成光子学元件还有很多难题。实现低损耗、高保真度的静态光信号和光信息存储,将大大提高量子信息处理的性能和效率,对量子计算、量子通讯、量子密码、全光网络等技术领域会起到巨大的推动作用<sup>[2-3]</sup>。

近年来,源于光与物质相互作用的原子相干效应已经成为光信息领域的研究重点,尤其是电磁感应光透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 现象,由于能够抑制经强耦合激光作用介质传播的弱光信号的吸收并增强透射,大大增加了光信号的传输距离,因此基于 EIT 现象,利用行波耦合的原子介质已被广泛地应用于光速减慢、光信息的相干存储与反馈<sup>[4-6]</sup>的研究中。目前,研究人员对相干驻波制备的 EIT 机制的研究已获得了显著的成果。譬如利用稳定的驻波对介质介电常数进行周期调制,实现了光子带隙<sup>[7-9]</sup>和光栅结构<sup>[10-11]</sup>。若对驻波的强度进行时间调制,可以使进入介质的探测场激发出前后两个分量,并耦合成一个群速度为零的静态光信号<sup>[12-15]</sup>。

这一机制为光信号处理或光比特控制提供了一个较长时间的非线性作用过程。但是,双色驻波场耦合作用会导致光学原子相干和自旋原子相干的一系列高阶空间傅里叶分量的激发,使静态光快速产生损耗和色散,这一性质影响了它的实际应用。

为了建立生成高效率、高保真度静态光信号的机制,本文采用了一对反向传播的行波激光场耦合的四能级双  $\Lambda$  型冷 $^{87}\text{Rb}$  原子样品作为介质进行研究。首先只开启正向耦合场引导一个正向弱探测光脉冲信号缓慢进入介质,然后同时绝热开启两个耦合激光场激发出反向光信号并与正向光信号耦合形成静态光信号。在此机制中,因为采用的是单色行波场对原子能级进行耦合,不会激发出高阶原子相干项,从而大大降低了光损耗,提高了静态光信号的生成效率和持续时间。文中还讨论了在生成静态光信号时对耦合场调制所需的必要操作条件,最后通过相位调制法对静态光信号进行了处理。

## 2 理论模型

图 1 表示样品长度  $L = 3.0 \text{ mm}$ , 原子密度  $N = 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  的一个冷 $^{87}\text{Rb}$  原子系综的四能级双  $\Lambda$  能级结构。本文选取了两种不同的精细能级结构: 能级结构 I 为  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle \rightarrow |1\rangle$ ,  $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |2\rangle$ ,  $|5P_{1/2}, F = 1\rangle \rightarrow |3\rangle$  和  $|5P_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |4\rangle$ ; 能级结构 II 为  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle \rightarrow |1\rangle$ ,  $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |2\rangle$ ,  $|5P_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |3\rangle$  和  $|5P_{3/2}, F = 2\rangle \rightarrow |4\rangle$ 。如图 1 所示,  $\omega_c$  和  $E_c$  分别

是耦合 $|2\rangle$ 与 $|3\rangle$ 跃迁通道的正向强相干激光场的频率和振幅; $\omega_d$ 和 $E_d$ 分别是耦合 $|2\rangle$ 与 $|4\rangle$ 跃迁通道的反向强相干激光场的频率和振幅; $\omega_p$ 和 $E_p$ 分别是探测 $|1\rangle$ 与 $|3\rangle$ 跃迁通道的正向弱光脉冲的频率和振幅。通过四波混频过程,在 $|1\rangle$ 与 $|4\rangle$ 跃迁通道上会激发出一个频率为 $\omega_s$ 、振幅为 $E_s$ 的反向感生探测脉冲场。

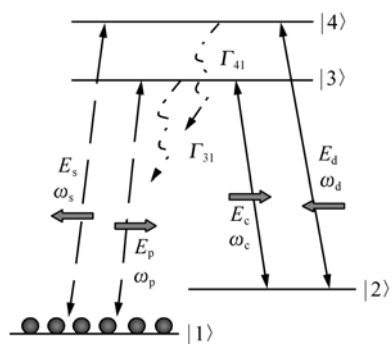


图1 与两个弱探测信号和两个强耦合场相互作用的四能级双 $\Lambda$ 型原子模型能级图

Fig. 1 Energy level diagram of a four-level double- $\Lambda$  atomic system interacting with two weak signal fields and two strong coupling fields

将此模型的相互作用哈密顿量带入刘维尔方程,可以得到描述模型原子能级分布和相干性的密度矩阵方程组。在弱光近似与共振条件下,可以将密度矩阵方程组简化为:

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_{12} &= -\gamma_{21}\rho_{12} - i\Omega_c\rho_{13} - i\Omega_d\rho_{14} \\ \dot{\rho}_{13} &= -\gamma_{31}\rho_{13} - i\Omega_c^*\rho_{12} - i\Omega_p^* \\ \dot{\rho}_{14} &= -\gamma_{41}\rho_{14} - i\Omega_d^*\rho_{12} - i\Omega_s^*,\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\Omega_i$  ( $i = p, s, c, d$ )为相应激光场的 Rabi 频率, $\gamma_{ai}$  ( $a = 2, 3, 4$ )为相应能级间的相干弛豫速率。根据所选能级结构, $\gamma_{21} = 0.2$  kHz,在能级结构 I 中  $\gamma_{31} = \gamma_{41} = 5.75$  MHz,在能级结构 II 中  $\gamma_{31} = 5.75$  MHz, $\gamma_{41} = 6.07$  MHz。

结合电磁场波动方程和极化强度关系  $P = Nd_{ab}\rho_{ba}$ ,在慢变化近似条件下可得:

$$\begin{aligned}\frac{\partial\Omega_p}{\partial z} &= -\frac{1}{c}\frac{\partial\Omega_p}{\partial t} + i\frac{N|d_{13}|^2k_p}{2\varepsilon_0\hbar}\rho_{31} \\ \frac{\partial\Omega_s}{\partial z} &= \frac{1}{c}\frac{\partial\Omega_s}{\partial t} - i\frac{N|d_{14}|^2k_s}{2\varepsilon_0\hbar}\rho_{41},\end{aligned}\quad (2)$$

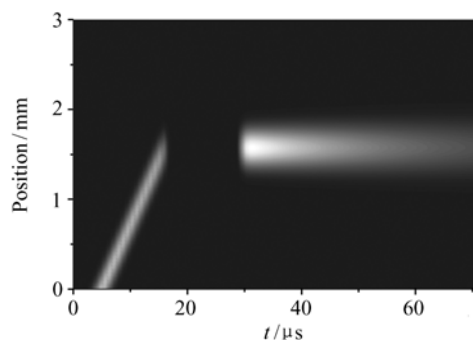
式中, $d_{ia}$  ( $a = 3, 4$ )为相应能级间的跃迁电偶极矩。

方程(1)和(2)组成了光信号的密度矩阵-麦克斯韦方程组,可以用来描述光信号在动态传播过程中的光学特性。

### 3 结果分析

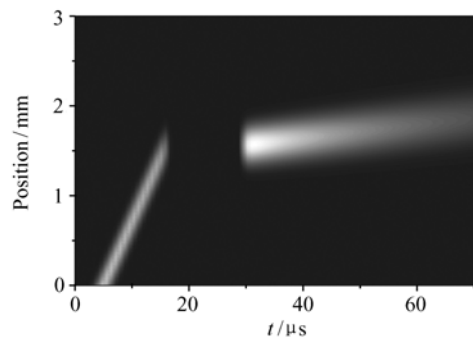
#### 3.1 静态光生成

图2(a)表示采用能级结构 I 时,光信号的动力学传播过程



(a) 选取能级结构 I 时,弱光信号在冷原子介质中的动力学传播过程

(a) Nonlinear propagation dynamics of signal fields moving in a sample of cold atoms with level structure I



(b) 选取能级结构 II 时,弱光信号在冷原子介质中的动力学传播过程

(b) Nonlinear propagation dynamics of signal fields moving in a sample of cold atoms with level structure II

图2 光信号存储与静态光信号制备过程

Fig. 2 Generation of optical signals for light storage and SLPs

态传播过程。激光场波长 $\lambda_p = \lambda_s = 780.778$  nm, $\lambda_c = \lambda_d = 780.778$  nm,偶极矩 $d_{13} = d_{14} = 1.0 \times 10^{-29}$  C·m,原子密度 $N = 1.0 \times 10^{13}$  cm $^{-3}$ 。首先,在 $t = 0$ 时单独开启正向耦合激光 $\Omega_c = 10$  MHz直到 $t \approx 17$   $\mu$ s时绝热关闭。在此期间正向光脉冲信号会缓慢地进入介质并转化为自旋原

子相干的空间波包,储存在介质中。当  $t \approx 29 \mu\text{s}$  时,同时开启 Rabi 频率均为 10 MHz 的正反两个行波耦合激光,自旋原子相干的空间波包又绝热转化为正反向两个光信号,但它们未向前移动,而是静止耦合在介质中,从而获得静态光信号。根据参考文献[15]可知,传统的利用驻波耦合介质生成静态光时,双色驻波耦合激发了光学原子相干和自选原子相干的一系列高阶空间傅里叶分量,使静态光快速产生损耗和色散,即静态光能量快速损失。相比之下,这里所选取的机制,静态光能量损失就慢得多,能为许多光信号处理与量子比特控制提供充分的作用时间。

实验时在能级结构 I 中,  $\gamma_{31} = \gamma_{41}$ ,但是根据具体实验或技术应用的的不同需求,会选择不同的原子精细能级结构,这样能级间弛豫速率会发生变化。图 2(b)所示的光信号动态传播,采用了能级结构 II 的  $^{87}\text{Rb}$  冷原子系综,耦合场的时间调制则与前面完全相同。从图 2(b)可见,由于  $\gamma_{31} \neq \gamma_{41}$ ,激发出的正反两个光信号不平衡,故共同耦合出的光场非静止而是发生缓慢的移动。

为了能够重新获取静态光,作者通过比较 Rabi 频率的定义式  $\Omega = dE/(2\hbar)$  与自发弛豫速率的关系式  $\Gamma_{ab} = \omega_{ab}^3 d_{ab}^3 / (3\pi\epsilon_0 c^3)^{[16]}$ ,尝试按比例:

$$\frac{\Omega_c^2}{\Omega_d^2} = \frac{\Gamma_{31}}{\Gamma_{41}} = \frac{\gamma_{31}}{\gamma_{41}}, \quad (3)$$

调节耦合激光场。

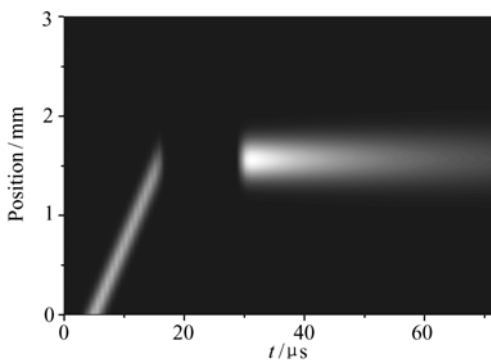


图3 选取能级结构 II 时,弱光信号在超冷原子介质中的动力学传播过程

Fig.3 Nonlinear propagation dynamics of signal fields moving in a sample of super cold atoms with level structure II

图 3 表示采用能级结构 II,在  $t \approx 29 \mu\text{s}$  时同时绝热开启正反两个耦合激光场制备静态光,开启  $\Omega_c = 10 \text{ MHz}$ ,  $\Omega_d = 10.27 \text{ MHz}$  条件下,光信号的动态传播过程。如图 3 所示,通过按比例调节耦合激光场,在弛豫速率不相等时也能获取令人满意的静态光信号,所以式(3)即为在形成静态光信号时,调节耦合激光场所需满足的必要条件。

### 3.2 相位调制

在此机制中,还可以对耦合激光场引入相位对静止光信号进行调节。设  $\varphi_i (i = p, s, c, d)$  为相应激光场的相位。假如输入的正向弱光信号的输入相位为零,对两个耦合场的相对相位  $(\varphi_d - \varphi_c)$  进行调节。图 4 表示当  $t \approx 31 \mu\text{s}$  时,介质中间位置的静态光信号强度随  $(\varphi_d - \varphi_c)$  的变化。

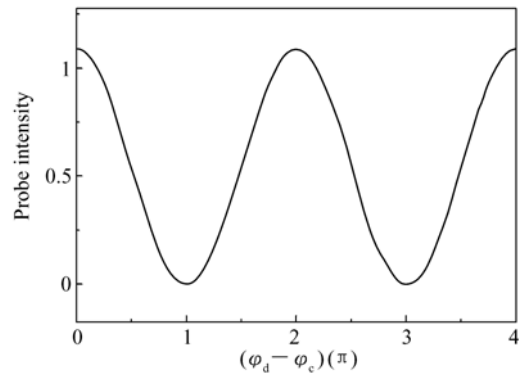


图4 静态光信号强度随耦合场相对相位的变化

Fig.4 Probe intensity as a function of relative phase of coupling fields

可见,随着耦合场相对相位的变化,静态光信号强度也随之发生周期性的涨落。这是因为双  $\Lambda$  型四能级经 4 个场耦合成一个闭合回路的形式<sup>[17-18]</sup>(如图 1 所示),且反向弱光信号是经过四波混频过程激发出来的,满足相位匹配条件,因此  $\varphi_p + \varphi_c - \varphi_d - \varphi_s = 0$ ,则  $\varphi_p - \varphi_s = \varphi_d - \varphi_c$ 。所以,两个弱光信号的相对相位  $(\varphi_p - \varphi_s)$  会随着  $(\varphi_d - \varphi_c)$  发生变化,两个弱光信号会发生周期性的相长或相消干涉,而它们叠加耦合成的静态光信号强度就会周期性涨落。

## 4 结 论

本文根据获取高效率、高保真度、长可持续时

间存储与静态光信号的要求,建立了一个由正双向耦合场耦合冷<sup>87</sup>Rb原子的四能级双 $\Lambda$ 型能级的机制。利用这一机制,成功实现了一个易于全光调控、动态的系统过程,这个过程包含了光信号的导入、光信号的存储、高保真度静态光信号的生成,并可持续接近80  $\mu$ s,能够为光信号处理与量子比特控制提供充足的作用时间。研究了在生

成静态光时,调制耦合激光场所要满足的条件,给出了利用相位对静态光信号强度进行调制的方法。此机制为相关的光信息处理和量子计算技术提供了基本的、稳定的操作环境支持,在制造量子计算器,全光元件、光子中继器等器件时具有潜在的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] KIMBLE H J. The quantum internet[J]. *Nature*,2008,453:1023-1030.
- [2] HAMMERER K. Quantum interface between light and atomic ensembles[J]. *Rev. Mod. Phys.*,2010,82:1041-1093.
- [3] BAJCSY M,ZIBROV A S,LUKIN M D. Stationary pulses of light in an atomic medium[J]. *Nature*,2003,426:638-641.
- [4] CUI C L,JIA J K,WU J H,*et al.*. Ultraslow and superluminal light propagation in a four-level atomic system[J]. *Phys. Rev. A*,2007,76:033815.
- [5] PUGATCH R,SHUKER M,FIRSTENBERG O,*et al.*. Topological stability of stored optical vortices[J]. *Phys. Rev. Lett.*,2007,98:203601.
- [6] CHOI K S,DENG H,LAURAT J,*et al.*. Mapping photonic entanglement into and out of a quantum[J]. *Nature*,2008,452:67-71.
- [7] ANDRE A,LUKIN M D. Manipulating light pulses via dynamically controlled photonic band gap[J]. *Phys. Rev. Lett.*,2002,89:143602.
- [8] WU J H,LAROCCA G C,ARTONI M. Controlled light-pulse propagation in driven color centers in diamond[J]. *Phys. Rev. B*,2008,77:113106.
- [9] ZHANG Y,XUE Y,WANG G,*et al.*. Steady optical spectra and light propagation dynamics in cold atomic samples with homogeneous or inhomogeneous densities[J]. *Opt. Express*,2011,19:2111-2119.
- [10] ZHAO L,WANG T,YELIN S E. Two-dimensional all-optical spatial light modulation with speed in coherent media[J]. *Opt. Lett.*,2009,34:1930-1932.
- [11] de CARVALHO S A,de ARAUJO L E E. Electromagnetically-induced phase grating: A coupled-wave theory analysis [J]. *Opt. Express*,2011,19:1936-1944.
- [12] BAJCSY M,ZIBROV A S,LUKIN M D. Stationary pulses of light in an atomic medium[J]. *Nature*,2003,426:638-641.
- [13] WU J H,ARTONI M,LAROCCA G C. All-optical light confinement in dynamic cavities in cold atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*,2009,103:133601.
- [14] LIN Y W,LIAO W T,PETERS T,*et al.*. Stationary light pulses in cold atomic media and without bragg gratings[J]. *Phys. Rev. Lett.*,2009,102:213601.
- [15] WU J H,ARTONI M,LAROCCA G C. Decay of stationary light pulses in ultracold atoms[J]. *Phys. Rev. A*,2010,81:033822.
- [16] WANG D W,LI Z H,ZHENG H,*et al.*. Time evolution, Lamb shift, and emission spectra of spontaneous emission of two identical atoms[J]. *Phys. Rev. A*,2010,81:043819.
- [17] WANG L G,QAMAR S,ZHU S Y,*et al.*. Manipulation of the Raman process via incoherent pump, tunable intensity, and phase control[J]. *Phys. Rev. A*,2008,77:033833.
- [18] HAO X Y,LI L H,LÜ X Y,*et al.*. Controllable amplification and absorption properties in coupled-double-quantum-wells with tunneling-induced interference[J]. *Eur. Phys. J. D*,2010,56:239-246.

作者简介:张岩(1982—),男,吉林长春人,博士,主要从事量子光学领域有关激光诱导原子相干效应等方面的研究。

E-mail:yanzhang@yahoo.cn