

文章编号: 1007-6654(2014)01-0051-05

在不同原子汽室空间中原子相干特性的比较

黄静波, 郭苗军, 周海涛, 郜江瑞, 张俊香[†]

(山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 我们对不同铯原子汽室空间中, 电磁诱导吸收(EIA)与电磁诱导透明(EIT)特性进行了比较。通过理论模拟原子在不同多普勒背景下的周期性吸收调制与原子相干效应的关系, 表明在狭小空间下的原子, 其 EIA 效应较弱, EIT 较强这一特性对应于介质可获得更好的周期性吸收调制, 这一特性可用于改善原子汽室中的光子晶体特性。

关键词: 不同原子汽室; 原子相干特性; 多普勒背景; 周期性吸收调制

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20142001.0051

原子相干效应的研究是量子光学领域的一个重要课题。近年来, 光与原子相互作用产生的电磁诱导透明(EIT)^[1]引起人们的持续关注, 比如: 用于加强非线性作用的激光冷却^[2]; 原子频率参考^[3]; 基于 EIT 介质中的信息存储^[4,5] 以及四波混频的研究^[6], 等等。

在一个具有多普勒背景的三能级原子系统中, 通常用一束较强的行波场与较弱探针场作用, 满足双光子共振时, 基态之间形成暗态, 对探针光产生诱导透明效果。当用驻波场代替行波场时, 暗态转变为亮态, 对探针光的透明转变为强吸收, 这种强吸收被称为电磁诱导吸收(EIA)^[7], 同时产生一束新的光场^[8-10]。目前对这一过程有三种解释。一种解释是驻波场在介质内形成 Bragg 光栅^[11], 当探针光与光栅方向垂直(平行)时, 探针光被光栅反射(衍射), 形成新的反射(衍射)信号。近些年, 关于这种光栅特性的研究越

来越多, 比如: 在冷原子系统中, 很多实验小组都观测到了 Bragg 光栅产生的衍射信号^[12-13]; 在热原子系统中, 2005 年, M. XIAO 等人在实验上得到了效率为 7% 的 Bragg 反射信号^[14], 并实现了一种新型的全光开关。这种非线性过程本质上也可以理解为由三阶非线性效应引起的四波混频现象。2004 年, Hoonsoo Kang 等人在冷原子系统中观测到了反射效率为 10% 的四波混频信号^[15]。2011 年, 我们小组在一个多普勒背景下的三能级铯原子中获得了反射效率分别为 43% 和 60% 的相干辐射场^[8,16], 并用色散补偿相位匹配的理论解释了实验结果。此外, 还有一种认识是基于光子晶体效应产生的禁带理论。原子介质在周期性驻波场作用下对穿过其中的探测场的折射率具有空间周期调制, 因而形成类似于光子晶体的周期性结构特性。2002 年, Lukin 小组提出了在 EIT 介质中形成一维光子带隙结构的理

收稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(11274210, 61308121); 国家重大科学研究计划课题(2010CB923102)、国家自然科学基金创新群体项目(61121064)

作者简介: 黄静波(1989-), 男, 山西人, 硕士研究生, 从事量子光学研究。E-mail: bobosea@126.com

[†]通讯作者: 张俊香, E-mail: junxiang@sxu.edu.cn

论^[17],随后,通过量子相干效应对光子带隙实现调控成为热门课题。2006年,Atoni等人从理论上改变前后耦合场的强度,用非完美驻波得到非常完美的光子带隙,并实现了可调谐性^[18]。2011年,Alexander Schilke等人在冷原子系统对探针光的光斑和入射角度进行优化,得到约为80%的反射信号和比较明显的能带结构^[19]。热原子由于系统结构简单,容易获得较高的反射信号,但是由于原子的热运动,多普勒效应导致能带结构并不明显。2010年,D. W. Li小组在一个三能级的铯原子中研究了透射光的带隙结构,得到的结果与理论相吻合^[20]。2011年,我们在热铯原子汽室中初步观测到了能带结构^[21]。基于此,通过改变前后驻波场的频率,形成“移动”的光子能带,该装置对前后入射的探针场起到光学二极管的作用^[22]。

我们知道,当原子处于受限空间时,热运动受到影响,原子吸收谱的多普勒背景会发生改变,可用于减少多普勒效应对原子汽室中能带结构建立的影响。为此我们比较了原子在处于狭小空间汽室中与普通汽室中时,探针场的多普勒宽度,在驻波调制下的吸收信号,并进行了相应的理论模拟,通过研究表明,在狭小汽室中的原子可以改善多普勒效应的影响,为进一步开展原子汽室中光子晶体相关特性研究奠定了基础。

1 理论模型

考虑一个三能级系统,能级结构如图1所示, $|a\rangle$ 为激发态, $|b\rangle$ 和 $|c\rangle$ 是基态。 $|a\rangle \rightarrow |b\rangle$ 和 $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$ 的跃迁频率分别为 ω_{ab} 和 ω_{ac} , $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁为偶极禁戒。探针场 $E_p(z, t) = \frac{1}{2} E_p \exp[-i\omega_p t + ik_p z] + c. c.$ 作用在 $|a\rangle \rightarrow |b\rangle$ 上,频率为 ω_p ,失谐量为 $\Delta p = \omega_p - \omega_{ab}$ 。耦合场作用在 $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$ 上,频率满足 $\omega_c = \omega_{ac}$ 。两束耦合场相向传播,在 Z 方向上形成驻波。前向耦合场为 $E_1(z, t) = \frac{1}{2} E_1 \exp[-i\omega_c t + ik_c z] + c. c.$,后向耦合场为 $E_2(z, t) = \frac{1}{2} E_2 \exp[-i\omega_c t - ik_c z] + c. c.$

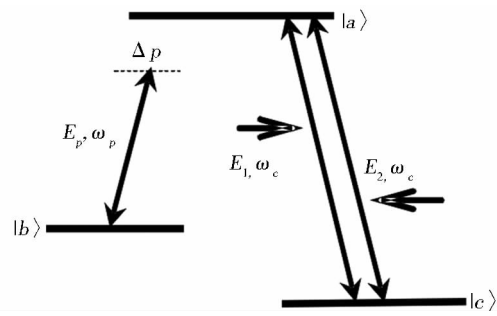


Fig. 1 three-level system
图1 三能级结构图

根据光与原子相互作用的半经典理论,在旋波近似和偶极近似下,系统相互作用哈密顿量表示为^[23]:

$$H_I = -\hbar\Delta_p(|b\rangle\langle b| + |c\rangle\langle c|) - \hbar[(\Omega_1 e^{ik_c z} + \Omega_2 e^{-ik_c z})|a\rangle\langle c| + g e^{ik_p z}|a\rangle\langle b| + H. c.], \quad (1)$$

其中 $g = \frac{\mu_{ab} E_p}{2\hbar}$, $\Omega_1 = \frac{\mu_{ac} E_1}{2\hbar}$, $\Omega_2 = \frac{\mu_{ac} E_2}{2\hbar}$ 分别是两束耦合场的拉比频率, μ_{ab} , μ_{ac} 为偶极矩阵元。

考虑系统的弛豫项,密度矩阵 $\rho(v, z, t)$ 的时间演化方程可以表示为^[24-25]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial z}\right) \rho = -\frac{i}{\hbar} [H_I, \rho] + R\rho, \quad (2)$$

v 代表原子沿 Z 方向的速度, R 是 Liouville 算符, $R\rho$ 代表原子间相互作用引起的弛豫过程。

我们将密度矩阵元展开,

$$\rho_{ab} = e^{ik_p z} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sigma_{ab}(n) e^{2nik_c z}, \rho_{bc} = e^{-ik_p z} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sigma_{bc}(n) e^{-(2n-1)ik_c z}. \quad (3)$$

在热原子系统中,我们需要考虑由原子运动引起的多普勒展宽。因此,对 $\sigma_{ab}(n)$ 的积分需要考虑所有原子的速度贡献。

$$\Phi_{ab}(\Delta_p, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_{ab}(n) f(v) e^{2nik_c z} dv, \quad (4)$$

$$f(v) = \frac{\exp(-v^2/v_p^2)}{v_p \sqrt{\pi}}$$

是麦克斯韦速度分布, $v_p = \sqrt{2KT/M} = \sqrt{2RT/M}$ 是最可几速率。

通过相关计算^[23,26,27],可以得到探针场的极化率和折射率:

$$\chi(\Delta_p, z) = 3\pi \left(\frac{\lambda_p}{2\pi}\right)^3 \frac{\gamma_{ab}\Phi_{ab}(\Delta_p, z)}{g} N_0, \quad (5)$$

$$n(\Delta_p, z) = \sqrt{1 + \chi(\Delta_p, z)}, \quad (6)$$

其中, N_0 代表原子数密度, λ_p 为探针光的频率。

我们利用(6)式模拟不同多普勒背景情况下探针光折射率的空间分布,如图 2。图中红色曲线是多普勒宽度为 400 M 时的曲线,蓝色曲线是多普勒宽度为 300 M 时的曲线,可以看到,多普勒宽度变小导致探针场的折射率空间调制增大。

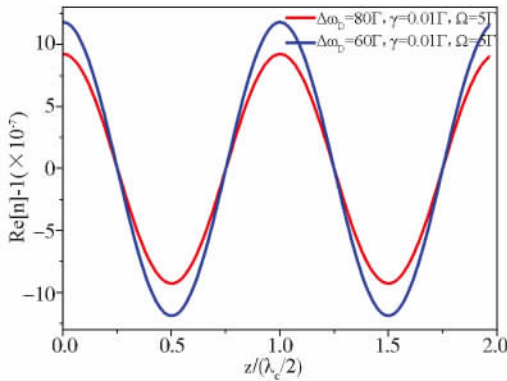


Fig. 2 Spatial distribution of the refractive index with different Doppler Background.

$$\Gamma = 2\pi \times 4.6 \text{ MHz}; T = 25 \text{ }^\circ\text{C}; N = 4.2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$$

图 2 不同多普勒背景下折射率的空间分布。

2 实验装置

我们用光栅外腔半导体激光器(ECDL)产生的光作为探针场;钛宝石激光器(Ti:sapphire)出射的光作为耦合场,经过半波片与偏振分束棱镜(PBS)后分为前向耦合场与后向耦合场,波片用来控制前后场的强度比例。前后耦合场相对入射在铯原子汽室中形成驻波,探针场与前向耦合场同向入射,探针场的透射信号被探测器(PD)探测。其中,探针场水平偏振,耦合场垂直偏振。实验在室温下进行,采用两种不同的铯原子汽室,分别是铯原子处于狭小空间和常规汽室空间的情况,比较探针光通过原子汽室后的透射谱。

能级选取为¹³³Cs 原子的 D1 线(图 3 所示),我们将耦合场频率锁定在 D1 线 $6^2S_{1/2}, F = 3 \rightarrow 6^2P_{1/2}, F' = 4$ 的跃迁线上,探针场频率在 $6^2S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6^2P_{1/2}, F' = 4$ 的跃迁线附近扫描。

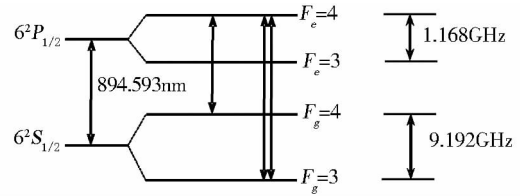


Fig. 3 Energy levels

图 3 实验能级图

3 实验结果与理论模拟

我们首先挡住前向和后向耦合场,让探针光分别通过两种铯原子汽室,用探测器 PD 探测透射信号。图 4 所示为归一化后的二能级吸收谱线,红色曲线代表非受限空间下,多普勒背景半高宽度为 391M;蓝色曲线对应受限空间的情况,多普勒背景半高宽度为 313 M。可以看到,当原子处于狭小空间时,二能级吸收谱的多普勒背景宽度变小。

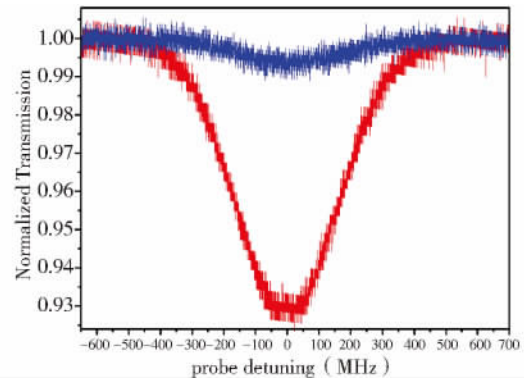


Fig. 4 Normalized two-level Doppler background. The red curve corresponds to the case of non-restricted space, the blue curve corresponds to the confined space situations.

图 4 归一化后二能级多普勒背景图。

我们加入前向和后向耦合场后,改变探针场与前后耦合场的功率,使透射谱线的 EIA 现象最明显。图 5(a)中的红色曲线和蓝色曲线分别代表非狭小空间与狭小空间下,通过透射谱得到的吸收系数。从图中可以看到,狭小空间下,原子对探针光的吸收减弱,EIA 现象变得不明显。5(b)是理论拟合的吸收曲线,可以看到,与实验现象比较吻合。

图 6 是在相同的功率下,只加入前向耦合场探测到的 EIT 透射谱。红色曲线和蓝色曲线分别代表非受限空间与受限空间下的透射谱。从图中我们可以看

到,受限空间下,EIT 现象的透明度得到了提高。

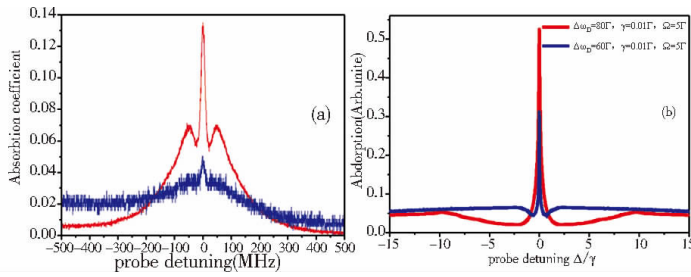


Fig. 5 Absorption coefficient of the probe light through two different atomic vapor, respectively, when we add the front and back coupling field. (a) the absorption coefficient obtained in the experiment; (b) the theoretical absorption curve. $\Gamma = 2\pi \times 4.6$ MHz; $T = 25^\circ\text{C}$, $N = 4.2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$.

图5 加入前后耦合场后,探针光经过两种不同原子汽室的吸收系数。

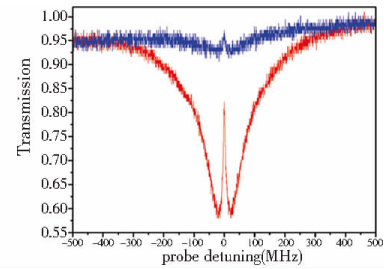


Fig. 6 Transmission spectrums of the probe light through two different atomic vapor, respectively, when we only add the front coupling field. $\Gamma = 2\pi \times 4.6$ MHz; $T = 25^\circ\text{C}$, $N = 4.2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$.

图6 只加入前向耦合场,探针光经过两种不同原子汽室后的透射谱。

4 总结与展望

研究表明狭小空间下,原子吸收谱线的多普勒宽度变小。在驻波场作用下,多普勒宽度变小引起探针光折射率的空间调制增强,我们知道,光子晶体的形成受介质内的折射率的空间分布影响,因此,这种多普勒效应的减弱,有利于我们在热原子介质中得到更好的光子晶体效应。

在上述基础上,我们从实验与理论上,研究比较

了狭小空间与非狭小空间下探针光的透射谱。在受限空间下,EIA 现象变得不明显,介质对探针光的吸收减弱,同时 EIT 现象更明显,尤其是透明度的提高,这对我们在 EIT 介质中获得更好的光子带隙有很大帮助。下一步我们希望对狭小空间下的反射信号进行研究,在热原子系统中获得较为明显的能带结构效应。

参考文献:

[1] Harris S E. Electromagnetically induced transparency[J]. *Phys Today*, 1997, **50**(7):36-42.
 [2] Lukin M D, Hemmer P R, and Scully M O. Resonant Nonlinear Optics in Phase-Coherent Media[J]. *Adv At, Mol Opt Phys*, 2000, **42**:347-386.
 [3] Hemmer P R, Ezekiel S, Leiby C C, Jr. Stabilization of a microwave oscillator using a resonance Raman transition in a sodium beam[J]. *Opt Lett*, 1983, **8**(8):440-442.
 [4] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A, Walsworth R L, Lukin M D. Storage of Light in Atomic Vapor[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(5):783-786.
 [5] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H, and Hau L V. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses [J]. *Nature*(London), 2001, **409**:490-493.
 [6] Gea-Banacloche Julio, Li Yong-qing, Jin Shao-zheng, and Xiao Min. Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media: Theory and experiment [J]. *Phys Rev A*, 1995, **51**:576.
 [7] Affolderbach C, Knappe S, Wynands R. Electromagnetically induced transparency and absorption in a standing wave [J]. *Phys Rev A*, 2002, **65**:043810.
 [8] Zhang Jun-xiang, Zhou Hai-Tao, Wang Da-Wei, et al. Enhanced reflection via phase compensation from anomalous dispersion in atomic vapor[J]. *Phys Rev A*, 2011, **83**:053841.
 [9] Ling H Y, Li Y Q, Xiao M. Electromagnetically induced grating; Homogeneously broadened medium [J]. *Phys Rev A*, 1998, **57**:1338-1344.
 [10] Mitsunaga M, Imoto N. Observation of an electromagnetically induced grating in cold sodium atoms [J]. *Phys Rev A*, 1999, **59**:4773-4776.
 [11] Bajcsy M, Zibrov A S, Lukin M D. Stationary pulses of light in an atomic medium[J]. *Nature*(London), 2003, **426**:638-

- 641.
- [12] Cardoso G C ,Tabosa J W R. Electromagnetically induced gratings in a degenerate open two-level system [J]. *Phys Rev A*, 2002, **65**:033803.
- [13] Kang H, Hernandez G, Zhu Y. Nonlinear wave mixing with electromagnetically induced transparency in cold atoms[J]. *J Mod Opt*, 2005, **52**(16):2391-2399.
- [14] Brown A W, Xiao M. All-optical switching and routing based on an electromagnetically induced absorption grating[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(7):699-701.
- [15] Kang H, Hernandez G, Zhu Y. Resonant four-wave mixing with slow light[J]. *Phys Rev A*, 2004, **70**:061804.
- [16] Zhou Hai-Tao, Wang Da-Wei, Wang Dan, Zhang Jun-xiang, *et al.* Efficient reflection via four-wave mixing in a Doppler-free electromagnetically induced transparency gas system [J]. *Phys Rev A*, 2011, **84**:053835.
- [17] André A, Lukin M D. Manipulating Light Pulses via Dynamically Controlled Photonic Band gap [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**:143602.
- [18] Artoni M, La Rocca G C. Optically Tunable Photonic Stop Bands in Homogeneous Absorbing Media [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **96**:073905.
- [19] Schilke Alexander, Zimmermann Claus, Courteille Philippe W, Guerin William. Photonic Band Gaps in One-Dimensionally Ordered Cold Atomic Vapors[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **106**:223903.
- [20] Li D W, Zhang L, Zhuo Z C, Kim J B, Su X M. Electromagnetically induced photonic bandgap in hot Cs atoms[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, **27**:690-695.
- [21] Zhou Hai-tao, Guo Miao-jun, Wang Dan, Gao Jiang-rui, Zhang Jun-xiang. Angular momentum and two-photon detuning dependence of reflection spectrum on degenerate two-level systems in Cs vapour [J]. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2011, **44**:225503.
- [22] Wang Da-Wei, Zhou Hai-Tao, Guo Miao-Jun, Zhang Jun-Xiang, Jörg Evers, Zhu Shi-Yao. Optical Diode Made from a Moving Photonic Crystal [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **110**:093901.
- [23] Kuang Shang-qi, Wan Ren-gang, Du Peng, Jiang Yun, Gao Jin-yue. Transmission and reflection of electromagnetically induced absorption grating in homogeneous atomic media[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(20):15455-15462.
- [24] Silva F, Mompert J, Ahufinger V, Corbalan R. Electromagnetically induced transparency in Doppler-broadened three-level systems with resonant standing-wave drive[J]. *Europhys. Lett*, 2000, **51**(3):286-292.
- [25] Silva F, Mompert J, Ahufinger V, Corbalan R. Electromagnetically induced transparency with a standing-wave drive the frequency up-conversion regime [J]. *Phys Rev A*, 2001, **64**:033802.
- [26] Kyrölä E, Salomaa R. Probe spectroscopy in an inhomogeneously broadened three-level system saturated by an intense standing wave [J]. *Phys Rev A*, 1981, **23**:1874-1892.
- [27] Feldman B J, Feld M S. Laser-Induced Line-Narrowing Effects in Coupled Doppler-Broadened Transitions [J]. *Phys Rev A*, 1972, **5**:899-918.

Comparison of Quantum Coherences of Atoms in Compact and Generous Spaces

HUANG Jing-bo, GUO Miao-jun, ZHOU Hai-tao, GAO Jiang-rui, ZHANG Jun-xiang

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

Abstract: The quantum coherences of electromagnetically-induced absorption (EIA) and electromagnetically-induced transparency (EIT) of atoms placed in different space of vapor cell were compared. Based on the theoretical analysis of the dependence of absorption modulation on quantum coherence in different vapor cell with different Doppler width, we found that the EIA decreased, while the EIT increased, leading to the improvement of absorption modulation, which can be used to improve the property of photonic crystal in confined space of atoms.

Key words: different space of vapor cell; quantum coherences of atoms; doppler background; absorption modulation