

真空诱导相干对电磁感应左手效应的影响^{*}

郑 军¹⁾²⁾³⁾ 刘正东¹⁾²⁾³⁾ 曾福华¹⁾²⁾ 方慧娟¹⁾²⁾

1) 南昌大学近代物理研究所, 南昌 330031)

2) 南昌大学纳米技术工程研究中心, 南昌 330047)

3) 南昌大学材料科学与工程学院, 南昌 330031)

(2007 年 12 月 6 日收到, 2008 年 6 月 13 日收到修改稿)

研究了具有超精细结构的四能级原子系统在电磁感应下的左手效应. 讨论了由交叉耦合自发辐射路径引起的真空诱导相干(VIC)对左手效应的影响. 研究表明, 在出现左手效应的频率区间 VIC 效应强弱对介质相对介电常数和相对磁导率实部取值有显著影响, 介质的左手效应随 VIC 效应的增强而增强.

关键词: 量子干涉, 真空诱导相干, 电磁感应, 左手效应

PACC: 4250, 4265

1. 引 言

近年来, 量子调控已越来越成为激光物理和量子光学的一个重要研究领域. 量子调控中的量子干涉效应产生了许多新的非线性光学现象, 如相干布居数俘获、无反转激光、Autler-Townes 效应、电磁感应透明、增强非线性光学过程的四波混频等^[1-7]. 同样基于量子干涉机理, Oktel 等^[8]提出利用电磁感应实现介质的左手效应从而使相应介质成为左手材料的方案. 在左手材料中, 电磁波的相速度和群速度方向相反, 使它不仅呈现逆 Doppler 效应、反常的 Cherenkov 效应和反常光压^[9]、完美透镜^[10]、反 Brewster 角和反临界角^[11, 12]、负的 Goss-Hanchen 横移^[13]等新颖的光学特性, 而且支持磁表面波传播^[14]. 由于左手材料的这些特殊性质, 使它在平板透镜、光束控制、光耦合器等方面具有广阔的应用前景而成为关注热点. 左手材料的实现方案有开口环共振器加金属线方法^[15-17]、传输线模型^[18]、光子晶体^[19, 20]、压电压磁多层膜^[21]等, 已经在实验上实现了红外和微波波段的左手效应. 与已有的宏观及介观层面的方法(如要求介质具有空间周期性结构)不同, 电磁感应左手材料^[8, 22-24]是利用耦合电磁跃迁诱导磁矩变化使相对磁导率产生显著改变从而实现左手效应, 它从微观的层面改变了介质的光学性

质, 而且能够实现在光频范围的左手效应.

真空诱导相干(VIC)效应是多能级原子系统中简并激发能级的自发辐射通道被一个连续的真空场相耦合, 其自发辐射通道间发生的量子干涉现象. VIC 效应会导致一系列非常有趣的物理现象, 如很窄的自发辐射谱^[25]、量子拍现象^[26]、自发辐射的禁戒^[27]和猝灭^[28]以及原子系统中吸收和色散性质的变异^[29]等等.

本文研究具有超精细双线上能级结构的准 Λ 型四能级原子和两个电磁场相互作用的量子系统, 利用量子干涉机理来实施对相对磁导率和相对介电常数的量子调控以实现左手效应, 并且讨论 VIC 对左手效应的影响.

2. 物理模型

考虑与两个激光场相耦合的封闭四能级原子系统^[29]如图 1 所示. 能级 $|3\rangle, |4\rangle$ 是超精细双线结构, 其能级间隔为 2Δ . 此系统允许的电偶极跃迁如下: 能级 $|2\rangle, |3\rangle(|4\rangle)$ 的能级间隔 $\omega_{32}(\omega_{42})$, 由弱探测场 ω_p 驱动, 拉比频率 $\Omega_p = d_{42} E_p / (2\hbar)$. 能级 $|1\rangle, |3\rangle(|4\rangle)$ 的能级间隔 $\omega_{31}(\omega_{41})$, 由强耦合场 ω_c 驱动, 拉比频率 $\Omega_c = d_{41} E_c / (2\hbar)$. d_{ij} 表示能级 $|i\rangle, |j\rangle$ 之间的电偶极矩阵元. 两个上能级

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60768001, 10464002)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zjdgroup@ncu.edu.cn

$|3\rangle, |4\rangle$ 到下能级 $|1\rangle (|2\rangle)$ 自发辐射系数分别为 $2\gamma_{3(32)}$ 和 $2\gamma_{4(42)}$. 设基态能级 $\hbar\omega_1 = 0$, 其他各能级 $E_j = \hbar\omega_j (j = 2, 3, 4)$. 耦合场与探测场失谐量分别为 $\Delta_c = \omega_c - \omega_0, \Delta_p = \omega_p - \omega_0$, 其中 $\omega_0 = (\omega_3 + \omega_4)/2$. 系统中宇称相同的 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ (能级间隔为 ω_{21}) 是电偶极禁戒的, 存在磁偶极跃迁 $\hat{\mu}_{12} = \langle 1 | \hat{\mu} | 4 \rangle \neq 0$, $\hat{\mu}$ 是磁偶极算符. 为使介质中光场电磁感应同时产生, 还要求满足能级间隔条件^[8] $\omega_{21} = \omega_{42}$.

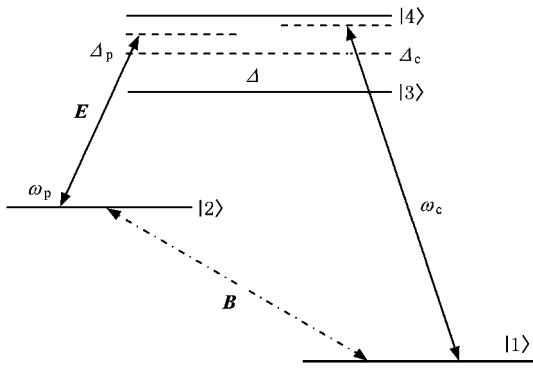


图 1 两激光场驱动的四能级原子模型

在偶极近似和旋波近似下, 利用密度矩阵的 Liouville 运动方程和自发辐射的 Weisskopf-Wigner 理论, 系统的密度矩阵元方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{44} = & i\Omega_p(\rho_{24} - \rho_{42}) + i\Omega_c(\rho_{14} - \rho_{41}) \\ & - \chi(\gamma_{41} + \gamma_{42})\rho_{44} \\ & - (\eta_1 + \eta_2)\chi(\rho_{43} + \rho_{34}), \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{33} = & i\Omega_p(\rho_{23} - \rho_{32}) + i\Omega_c(\rho_{13} - \rho_{31}) \\ & - \chi(\gamma_{31} + \gamma_{32})\rho_{33} \\ & - (\eta_1 + \eta_2)\chi(\rho_{43} + \rho_{34}), \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{22} = & i\Omega_p(\rho_{32} - \rho_{23}) + i\Omega_c(\rho_{42} - \rho_{24}) \\ & + 2\gamma_{32}\rho_{33} + 2\gamma_{42}\rho_{44} + 2\eta_2(\rho_{43} + \rho_{34}), \end{aligned} \quad (1c)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{43} = & -(\gamma_{41} + \gamma_{42} + \gamma_{31} + \gamma_{32} + 2i\Delta)\rho_{43} \\ & + i\Omega_p\rho_{23} - i\Omega_p\rho_{42} + i\Omega_c\rho_{13} \\ & - i\Omega_c\rho_{41} - (\eta_1 + \eta_2)\chi(\rho_{44} + \rho_{33}), \end{aligned} \quad (1d)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{42} = & -(\gamma_{41} + \gamma_{42} + \chi(\Delta - \Delta_p))\rho_{42} \\ & + i\Omega_c\rho_{12} - i\Omega_p\rho_{43} + i\Omega_p(\rho_{22} - \rho_{44}) \\ & - (\eta_1 + \eta_2)\rho_{32}, \end{aligned} \quad (1e)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{41} = & -(\gamma_{41} + \gamma_{42} + \chi(\Delta - \Delta_c))\rho_{41} + i\Omega_p\rho_{21} \\ & - i\Omega_c\rho_{43} + i\Omega_c(\rho_{11} - \rho_{44}) \\ & - (\eta_1 + \eta_2)\rho_{31}, \end{aligned} \quad (1f)$$

$$\dot{\rho}_{32} = -(\gamma_{31} + \gamma_{32} - \chi(\Delta + \Delta_p))\rho_{32}$$

$$\begin{aligned} & + i\Omega_c\rho_{12} - i\Omega_p\rho_{43} + i\Omega_p(\rho_{22} - \rho_{33}) \\ & - (\eta_1 + \eta_2)\rho_{42}, \end{aligned} \quad (1g)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{31} = & -(\gamma_{31} + \gamma_{32} - \chi(\Delta + \Delta_c))\rho_{31} + i\Omega_p\rho_{21} \\ & - i\Omega_c\rho_{34} + i\Omega_c(\rho_{11} - \rho_{33}) \\ & - (\eta_1 + \eta_2)\rho_{41}, \end{aligned} \quad (1h)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{21} = & -(\Delta_p - \Delta_c)\rho_{21} + i\Omega_p\rho_{31} \\ & + i\Omega_p\rho_{41} - i\Omega_c\rho_{23} - i\Omega_c\rho_{24}. \end{aligned} \quad (1i)$$

上述方程还应该满足封闭原子系统条件

$$\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} = 1,$$

$$\rho_{ij} = \rho_{ji}^*.$$

方程(1a)–(1i)中, 参量

$$f = d_{32}/d_{42},$$

$$g = d_{31}/d_{41}$$

是电偶极矩的比值, 在本文中, 设 $f = g = 1$; 参量

$$\eta_1 = \sqrt{\gamma_{41}\gamma_{31}}\cos\theta_1,$$

$$\eta_2 = \sqrt{\gamma_{42}\gamma_{32}}\cos\theta_2$$

反映由两衰变通道 $|4\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ ($|4\rangle \leftrightarrow |2\rangle$) 和 $|3\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ ($|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$) 之间交叉耦合引起的量子干涉效应, 即 VIC 效应, 其中 θ_1 和 θ_2 是两个感应电偶极矩 d_{41} 与 d_{31} 和 d_{42} 与 d_{32} 间的夹角. 值得指出的是, 当能级 $|3\rangle, |4\rangle$ 的频率差 2Δ 与自发辐射系数 $2\gamma_{3j}$ 和 $2\gamma_{4j}$ ($j = 1, 2$) 相比不是太大时才会呈现 VIC 效应.

介质对探测场的电响应与密度矩阵非对角元 $\rho_{42} + \rho_{32}$ 有关, 在光频 ω_p 驱动下产生一个电偶极振荡. 当选择探测场 E_p 与 d_{42} (d_{32}) 平行时, 电极化率张量简化为一个标量^[22]

$$\alpha_e = \frac{|d_{42}|^2(\rho_{42} + \rho_{32})}{\hbar\epsilon_0\Omega_p}. \quad (2)$$

探测光的磁场部分 B 与能级 $|2\rangle - |1\rangle$ 相互作用产生磁跃迁, 原子系统对探测场的磁响应与密度矩阵元 ρ_{12} 有关. 为计算简便, 设探测光的磁场 $B(\omega_p)$ 与 $\hat{\mu}_{12}$ 平行, 磁极化率张量简化为一个标量^[22], 即

$$\alpha_m = \frac{\mu_0 c \mu_{12} d_{42} \rho_{12}}{\hbar \xi \Omega_p}, \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速, μ_0 为真空磁导率, ξ 是模为 1 的复数, 其值由原子系统关于 E_p 的极化强度决定.

利用(2)和(3)式得出相对介电常数和相对磁导率

$$\epsilon_r = 1 + N\alpha_e, \quad (4)$$

$$\mu_r = \frac{1}{1 - N\alpha_m}. \quad (5)$$

在相对介电常数和相对磁导率的实部同时为负值的区域, 介质折射率表达式^[9]为

$$n = -\sqrt{\epsilon_r \mu_r}. \quad (6)$$

左手材料的电磁吸收系数 A 的表达式^[23]为

$$A = 2\pi \text{Im}(-\sqrt{\epsilon_r \mu_r}). \quad (7)$$

3. 数值分析

在以下数值计算中以自发辐射系数 γ_{31}^{-1} 为单位, 取 $\gamma_{3j} = \gamma_{4j} = 1 (j = 1, 2)$. 在稳态下, 求密度矩阵元方程(1)的数值解. 其他各参量取值如下: $\Omega_c = 2.0$, $\omega_p = 0.01$, $\Delta = 1.0$, $\Delta_c = 0$; 原子电偶极矩、磁

矩以及原子数密度取值分别为 $|d_{42}| = 10^{-32} \text{ Cm}$, $|\mu_{12}| = \mu_B = 1.1654 \times 10^{-29} \text{ Am}^2$, $N = 10^{20} \text{ m}^{-3}$; 参数 $\xi = \cos(-0.6) + i \sin(-0.6)$. 两衰变通道 $|4 \leftrightarrow |1$ 和 $|3 \leftrightarrow |1$ 及 $|4 \leftrightarrow |2$ 和 $|3 \leftrightarrow |2$ 之间交叉耦合路径引起的 VIC 量子干涉效应的强弱, 由参量 η_1, η_2 表达式中两感应电偶极矩 $d_{41}(d_{42})$ 和 $d_{31}(d_{32})$ 间的夹角 θ_1, θ_2 决定. θ_1, θ_2 取值分别为 $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2, \pi/3$ 和 0 .

图 2 所示为相对介电常数实部 $\text{Re}\epsilon_r$ 及虚部 $\text{Im}\epsilon_r$ 和相对磁导率实部 $\text{Re}\mu_r$ 及虚部 $\text{Im}\mu_r$ 随探测光失谐量 Δ_p 变化曲线, 图中的实线、点线和短划线分别表示 $\eta_1 = \eta_2 = 0$ (无 VIC), $\eta_1 = \eta_2 = 0.5$ (弱 VIC) 和 $\eta_1 = \eta_2 = 1$ (强 VIC) 时的情形.

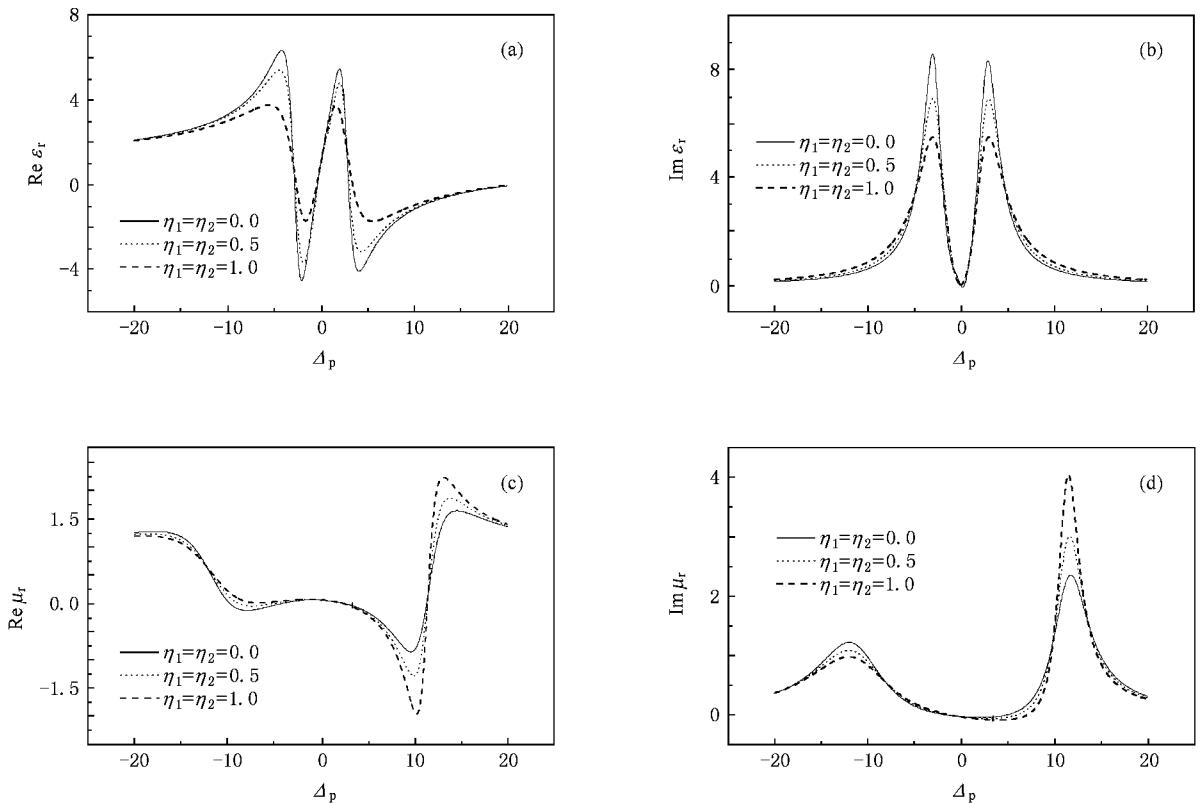


图 2 相对介电常数和相对磁导率实部及虚部随探测光失谐量的变化 (a) 相对介电常数实部随探测光失谐量的变化 (b) 相对介电常数虚部随探测光失谐量的变化 (c) 相对磁导率实部随探测光失谐量的变化 (d) 相对磁导率虚部随探测光失谐量的变化

从图 2(a) 和 (c) 可以看出, $\text{Re}\epsilon_r$ 和 $\text{Re}\mu_r$ 同时取负值的公共区间为 $3.5 \leq \Delta_p \leq 10.3$, 表明在此区间介质对探测光呈现左手效应. 由图 2(a) 还可以看出, $\text{Re}\epsilon_r$ 达到最小值的位置随着 VIC 效应的增强而向右侧偏移, 三组 $\text{Re}\epsilon_r$ 取最小值分别为 -4.08 , -3.18 和 -1.74 , 相应的 Δ_p 分别为 $4.1, 4.4$ 和 5.7 ,

说明 VIC 对光场的电响应有所减弱. 由图 2(c) 可以看出, 在呈现左手效应的区间内, 随着 VIC 效应的增强, 三组 $\text{Re}\mu_r$ 取最小值分别为 $-0.87, -1.29$ 和 -1.96 , 相应的 Δ_p 分别为 $9.6, 10.0$ 和 10.2 , 表明 VIC 对光场的磁效应有所增强. 图 2(b) 和 (d) 中的 $\text{Im}\epsilon_r$ 和 $\text{Im}\mu_r$ 与介质对光场的吸收密切相关. 从图 2

(b)和(d)中可以看出,在 $\Delta_p = 0$ 时 $\text{Im}\epsilon_r$ 和 $\text{Im}\mu_r$ 同时为零,这时介质对探测光无吸收,呈现电磁感应透明.在图2(b)中 $\Delta_p = \pm 3$ 时出现吸收峰,随VIC效应增强,图中吸收峰峰值逐渐下降.这些与用装饰态理论解释的VIC效应对吸收的抑制以及吸收峰出现在 $\Delta_p = \pm \sqrt{\Delta^2 + 2\Omega_c^2}$ 相符.图2(d)也显示出双吸收峰结构,VIC效应抑制了 $\text{Im}\mu_r$ 的左峰高度但是增加了其右峰高度,左峰和右峰处 Δ_p 分别为 -12.5 和 11.6 .因此,图2(b)(d)中的双吸收峰均不在左手效应频率范围内,这些都有利于减小介质对光场的吸收.总之,VIC效应对各曲线的峰谷值的调制非常明显,特别是增大了左手效应中的磁响应强度.从图2(c)可以看出,在出现左手效应频率区间 $\text{Re}\mu_r$

曲线的深度明显增加.

图3给出了介质折射率实部 $\text{Re}n$ 和吸收系数 A 随探测光失谐量 Δ_p 的变化规律.图3(a)反映的是介质对探测光的色散关系.从图3(a)可以看到,在出现左手效应的大部分频率区间内,介质对探测光呈现反常色散效应.随着VIC由强到弱变化,负折射率实部的取值范围分别为 $[-1.38, -0.73]$, $[-1.24, -0.76]$ 和 $[-1.10, -0.69]$,表明VIC增强了左手效应.图3(b)反映的是在介质出现左手效应的区域介质对探测光的吸收情况.从图3(b)可以看出,吸收系数随探测光失谐量的增加而增大.吸收系数在整个区域取正值说明介质对探测光都是吸收的,吸收系数随VIC效应的增强而略有增大.

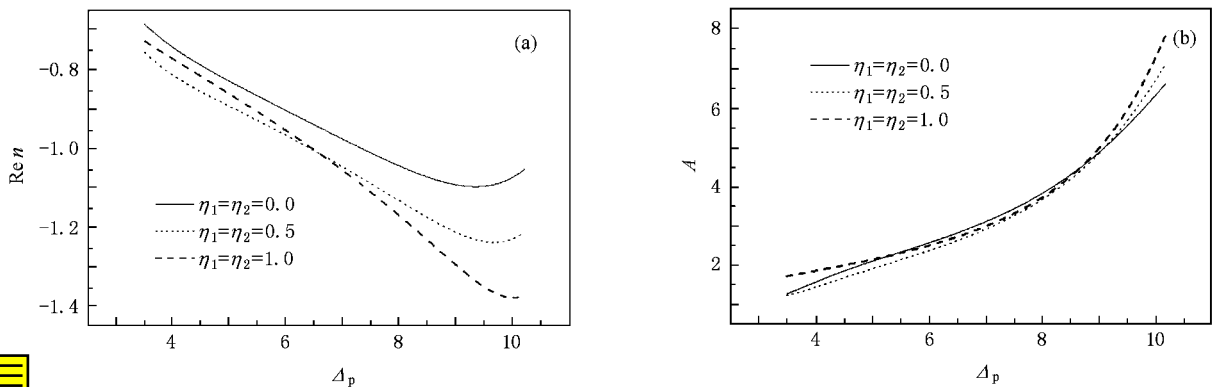


图3 介质折射率实部 $\text{Re}n$ 和吸收系数 A 随探测光失谐量 Δ_p 的变化 (a) $\text{Re}n$ 随 Δ_p 的变化 (b) A 随 Δ_p 的变化



4. 结 论

本文研究了具有超精细双线结构的四能级原子与两激光场相互作用的量子系统,在弱探测场的条件下,选择适当的光场与原子系统相互作用的参量条件,利用量子干涉机制在一定的频率区间实现介质的左手效应.同时还讨论了由两衰变通道

$|4 \leftrightarrow |1$ 和 $|3 \leftrightarrow |1$ 及 $|4 \leftrightarrow |2$ 和 $|3 \leftrightarrow |2$ 之间交叉耦合引起的VIC效应对系统出现的左手效应的影响.结果表明,VIC效应对系统出现左手效应的频率范围影响不大,但是可以调整左手效应的效果,如在出现左手效应的频率区间,VIC效应强弱对介质相对介电常数和相对磁导率实部的取值有显著影响,介质的左手效应随VIC效应的增强而增强.

[1] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Harris S E 1999 *Nature* **397** 594
 [2] Yang L J, Zhang L S, Li X L 2005 *Phys. Rev. A* **72** 053801
 [3] Li Y F, Sun J F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 547 (in Chinese) [李永放、孙建锋 2003 物理学报 **52** 547]
 [4] Fleischhauer M, Lukin M D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5094
 [5] Liu Z D, Wu Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2970 (in Chinese) [刘正东、武强 2004 物理学报 **53** 2970]
 [6] Zhang L Y, Liu Z D, Chen J 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1419 (in

Chinese) [张丽英、刘正东、陈峻 2006 光学学报 **26** 1419]
 [7] Xue Y, He Q Y, LaRocca G C, Artoni M, Xu J H, Gao J Y 2006 *Phys. Rev. A* **73** 013816
 [8] Oktel M Ö, Müstecaplıoğlu Ö E 2004 *Phys. Rev. A* **70** 053806
 [9] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
 [10] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
 [11] Fu C, Zhang Z M, First P N 2005 *Appl. Opt.* **44** 3716
 [12] Grzegorzayk T M, Thomas Z M, Kong J A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 251909

- [13] Berman P R 2002 *Phys. Rev. E* **66** 067603
- [14] Gollub J N , Smith D C , Vier D C , Perram T , Mock J J 2005 *Phys. Rev. B* **71** 195402
- [15] Pendry J B , Holden A J , Stewart W J , Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [16] Pendry J B , Holden A J , Robbins D J , Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075
- [17] Shelby R A , Smith D R , Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [18] Grbic A , Eleftheriades G 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 117403
- [19] Paremi P , Lu W , Vodo P , Sokoloff J , Derov J S , Sridhar S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 127401
- [20] Moussa R , Foteinopoulou S , Zhang L , Tuttle G , Guven K , Ozbay E , Soukiolis C M 2005 *Phys. Rev. B* **71** 085106
- [21] Liu H , Zhu S N , Dong Z G , Zhu Y Y , Chen Y F , Ming N B 2005 *Phys. Rev. B* **71** 125106
- [22] Thommen Q , Mandel P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 053601
- [23] Zhang H J , Gong S Q , Niu Y P , Lin L R , Xu Z Z 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1769
- [24] Zeng F H , Liu Z D , Zheng J , Fang H J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2218 (in Chinese) [曾福华、刘正东、郑 军、方慧娟 2008 物理学报 **57** 2218]
- [25] Keitel C H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 1307
- [26] Anil K P , Agarwal G S 1999 *Phys. Rev. A* **59** 3015
- [27] Berman P R 1998 *Phys. Rev. A* **58** 4886
- [28] Hui R X , Cen Y Y , Zhu S Y 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1032
- [29] Wei H , Li J H , Zhan Z M , Peng J C 2005 *Commun. Theor. Phys.* **44** 146

Electromagnetically induced left-handedness with vacuum-induced coherence^{*}

Zheng Jun^{1,2,3)} Liu Zheng-Dong^{1,2,3)†} Zeng Fu-Hua^{1,2)} Fang Hui-Juan^{1,2)}

¹ *Institute of Modern Physics , Nanchang University , Nanchang 330031 , China*

² *Engineering Research Center for Nanotechnology , Nanchang University , Nanchang 330047 , China*

³ *School of Materials Science and Engineering , Nanchang University , Nanchang 330031 , China*

(Received 6 December 2007 ; revised manuscript received 13 June 2008)

Abstract

The electromagnetically induced left-handedness in a four-level atomic system associated with a pair of upper excited hyperfine levels has been investigated. The properties of left-handedness with vacuum-induced coherence (VIC) arising from the cross coupling spontaneous emission pathways have also been discussed. The theoretical analyses show that the left-handedness of medium will be enhanced with the increase of VIC effect.

Keywords : quantum interference , vacuum-induced coherence , electromagnetic induction , left-handedness

PACC : 4250 , 4265

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60768001 , 10464002).

[†] Corresponding author. E-mail : lzdgroup@ncu.edu.cn