

文章编号:1001-5078(2024)10-1613-06

· 光学技术 ·

级联双缀饰四波混频缀饰相互作用的功率控制

麻晓宇, 桑苏玲

(宁夏师范学院 物理与电子信息工程学院, 宁夏 固原 756000)

摘要: 主要研究 Y 型四能级原子系统中缀饰场功率控制的级联双缀饰四波混频的缀饰相互作用。首先, 基于缀饰态理论求解当两个缀饰场同时入射非线性光学介质时的缀饰态的本征值, 研究缀饰能级的位置与缀饰场功率的关系。接着, 使用改变缀饰场功率, 扫描探测场失谐的方法, 研究四波混频的缀饰相互作用。研究发现, 当两个缀饰场的失谐不同时, 原子介质中会产生三个缀饰能级, 相同时则会产生两个缀饰能级; 而且两个缀饰场功率的变化都会令缀饰能级的位置发生偏移, 偏移的程度决定于缀饰场的失谐。

关键词: 非线性光学; 四波混频; 缀饰态; 电磁诱导透明

中图分类号: O437; TN241 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.016

Power control of interaction of dressing fields of sequential-doubly-dressed four-wave mixing

MA Xiao-yu, SANG Su-ling

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Ning Xia Normal University, Guyuan 756000, China)

Abstract: The power control of the interaction of dressing fields of sequential-doubly-dressed four-wave mixing (FWM) in Y-type four energy-level systems is studied in this paper. Firstly, the eigenvalues of the dressed states are solved when two dressing fields are incident simultaneously in the nonlinear optical media based on the theory of the dressed states. And the relation of the position of the dressed states and the power of the dressing fields is researched. Then, the interaction of two dressing fields of FWM is shown by scanning the frequency detuning of the probe field along with changing the power of the dressing field. It is found that three embellishment energy levels are produced in the atomic medium when the detuning of the two embellishment fields are different, and when they are the same, two embellishment energy levels are produced. Moreover, changes in the power of the two embellishment fields cause the position of the embellishment energy levels to be shifted, and the degree of the shift is determined by the detuning of the embellishment fields.

Keywords: nonlinear optics; four-wave mixing; dressed states; electromagnetically induced transparency

1 引言

当激光与非线性光学介质相互作用时, 介质的不同能级间会发生耦合产生原子相干^[1]。基于原子相干会产生电磁诱导透明 (Electromagnetically In-

duced Transparency, EIT) 及四波混频 (FWM, Four-Wave Mixing) 等现象。FWM 是由介质的三阶非线性极化引起的四束激光相互作用的现象^[2], 它在很多领域比如光谱探测等方面发挥着重要的作

基金项目: 宁夏自然科学基金项目 (No. 2021AAC03246) 资助。

作者简介: 麻晓宇 (1998 -), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: xymadr@163.com

通讯作者: 桑苏玲 (1974 -), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: slsngbm@163.com

收稿日期: 2024-01-02; 修订日期: 2024-03-15

用^[3-4]。缀饰态 (Dressed States) 理论是研究原子相干这种强相互作用的重要方法^[5-8]。早在 1991 年, Harris 等人就提出了 EIT 的概念^[9]。随后, 实验上证实了 EIT 可增强介质的非线性效应^[10], 这引起了对于 FWM 现象的广泛研究^[11-12], 其研究成果可应用于量子纠缠^[13-14]、量子通信^[15-17] 及精密测量^[18] 等领域。

本文基于缀饰态理论计算了当两个缀饰场同时入射非线性光学介质时所产生的原子相干效应; 随后, 借助 FWM 信号研究了两个缀饰场之间的相互作用。这种缀饰场间的相互作用体现在产生的缀饰能级均同时受到两个缀饰场的功率和失谐等参量的影响。

2 基本原理

2.1 四波混频及其密度矩阵方程

如图 1(a)、(b) 所示依次为级联双缀饰 FWM 系统的能级图和光路几何配置^[12,19-20]。跃迁于 $|0\rangle$ 能级到 $|1\rangle$ 能级的三束入射激光分别为泵浦场 E_1 (频率 ω_1 , 波矢 k_1 , Rabi 频率 G_1) 和 E'_1 (ω_1, k'_1, G'_1) 及探测场 E_3 (ω_3, k_3, G_3)。这三束激光来自于同一激光器, 为 FWM 信号的产生场, 定义它们的失谐为 $\Delta_1 = \Omega_{10} - \omega_1$, 其中 Ω_{10} 为 $|0\rangle$ 能级到 $|1\rangle$ 能级的共振频率。另有两束缀饰场 E_2 (ω_2, k_2, G_2) 和 E_4 (ω_3, k_4, G_4) 分别来自另外两台激光器, 定义 $|1\rangle$ 能级到 $|2\rangle$ 能级及 $|1\rangle$ 能级到 $|3\rangle$ 能级之间的失谐为 $\Delta_2 = \Omega_{21} - \omega_2$ 和 $\Delta_3 = \Omega_{31} - \omega_3$, 式中 Ω_{21} 为 $|1\rangle$ 能级到 $|2\rangle$ 能级的共振频率, Ω_{31} 为 $|1\rangle$ 能级到 $|3\rangle$ 能级的共振频率。Rabi 频率的定义是 $G_n = \mu_{ij} E_n / \hbar$ ($n = 1, 2, 3, 4$), 其中 E_n 是电场强度, μ_{ij} 是能级 $|i\rangle$ 和 $|j\rangle$ 之间的跃迁偶极矩。五束激光的传播方向配置如图 1(b) 所示, 光束 E_1 沿 z 轴正向传播, 光束 E'_1 与 E_1 之间存在微小夹角, 光束 E_3 与 E_1 的传播方向是相反的。泵浦场 E_1 和 E'_1 功率较大, 它们在介质中产生三阶非线性光学效应, 根据相位匹配条件 $k_F = k_1 - k'_1 + k_3$, 在与 E'_1 相反的方向上可测得简并四波混频 (DFWM, Degenerated - FWM) 信号 E_F (ω_1, k_F, Δ_1 和 $G_F = \mu_{10} E_F / \hbar$)。光束 E_2 和 E_4 功率也较大, 将对 FWM 信号起到缀饰作用。当它们同时打开时, 就会获得级联双缀饰 FWM 信号。为了更好地地区分光束 E_2 和 E_4 对 FWM 信号的缀饰作用, 让它们沿相反方向传播。

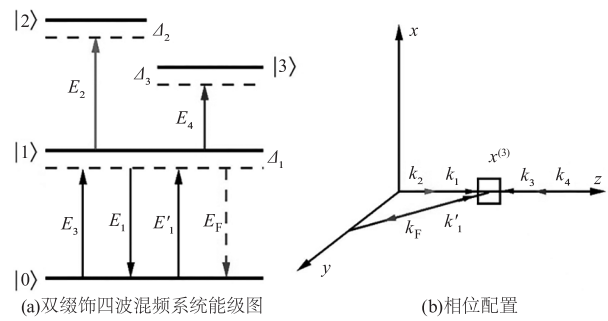


图 1 Y 型四能级系统及空间配置

Fig. 1 Y-type energy-level system and geometric configuration

首先, 关闭入射光束 E_2 和 E_4 , 考虑无缀饰的 DFWM 信号 E_F 。对该信号来说, 在偶极近似的条件下, 此系统的相互作用哈密顿算符^[19,21]为:

$$H_1 = \hbar \Delta_1 |1\rangle \langle 1| - \hbar (G_3 e^{ik_3 r} |1\rangle \langle 0| + G_1 e^{ik_1 r} |1\rangle \langle 0| + G'_1 e^{ik'_1 r} |1\rangle \langle 0| + H. c.) \quad (1)$$

式中, r 为空间中某点的位置矢量; $H. c.$ 表示括号内前三项的厄米共轭量。通过密度矩阵方程 $\frac{\partial \rho}{\partial t} =$

$$\frac{1}{i\hbar} [H_1, \rho] - \Gamma \rho, \text{ 以及微扰链 } \rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{G_1} \rho_{10}^{(1)} \xrightarrow{(G'_1)^*} \rho_{00}^{(2)} \xrightarrow{G_3} \rho_{10}^{(3)}, \text{ 可得稳态条件下的 DFWM 信号密度矩阵元}^{[20]} \text{ 为:}$$

$$\rho_{10}^{(3)} = g e^{ik_F r} / \Gamma_{00} d_1^2 \quad (2)$$

其中, ρ 为密度矩阵; Γ 为弛豫系数矩阵; $g = -iG_3 G_1 (G'_1)^*$, $d_1 = i\Delta_1 + \Gamma_{10}$, Γ_{ij} 是 $|i\rangle$ 能级与 $|j\rangle$ 能级之间的横向弛豫系数; $(G'_1)^*$ 为 G'_1 的共轭。FWM 信号的强度 I_F 正比于 $|\rho_{10}^{(3)}|^2$ 。由公式 (2) 可知, 改变激光 E_1 、 E'_1 和 E_3 的频率, DFWM 信号 I_F 的强度也随之变化, 当激光与 $|1\rangle$ 能级共振即 $\Delta_1 = 0$ 时, 产生的 DFWM 信号 I_F 强度最大。

当分别作用在 $|1\rangle$ 能级到 $|2\rangle$ 能级和 $|1\rangle$ 能级到 $|3\rangle$ 能级的缀饰场 E_2 和 E_4 共同缀饰 $|1\rangle$ 能级时, 就可得到级联双缀饰的 FWM 信号, 由于该信号的跃迁路径及微扰链为 $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{G_1} \rho_{(G_2 \pm G_4 \pm)0}^{(1)} \xrightarrow{(G'_1)^*} \rho_{00}^{(2)} \xrightarrow{G_3} \rho_{(G_2 \pm G_4 \pm)0}^{(3)}$, 得出对应的三阶密度矩阵元^[20] 的形式为:

$$\rho_{10}^{(3)} = g e^{ik_F r} / [\Gamma_{00} (d_1 + |G_2|^2/d_2 + |G_4|^2/d_3)^2] \quad (3)$$

式中, $d_2 = \Gamma_{20} + i(\Delta_1 + \Delta_2)$, $d_3 = \Gamma_{30} + i(\Delta_1 - \Delta_3)$ 。缀饰场 E_2 和 E_4 分别缀饰同一能级, 缀饰效应是独立的, 它们通过同一矩阵元连接在一起对缀饰能级

产生作用。

2.2 缀饰态理论

对上述级联双缀饰而言,缀饰效应的产生是缀饰场 E_2 和 E_4 共同缀饰 $|1\rangle$ 能级的结果,下面用缀饰态理论对此现象进行理论分析。在缀饰态表象下,两个缀饰场 E_2 和 E_4 与原子能级 $|1\rangle$ 发生相互作用,原子能级 $|1\rangle$ 在与强场的共同耦合作用下产生新的缀饰态,分别为 $|\alpha_1\rangle$, $|\alpha_2\rangle$ 和 $|\alpha_3\rangle$ 。写出在薛定谔表象下缀饰场 E_2 和 E_4 对 $|1\rangle$ 能级作用的哈密顿量 H' 如式:

$$H' = \hbar [\Delta_2 |2\rangle\langle 2| + \Delta_3 |3\rangle\langle 3| - (G_2 |2\rangle\langle 1| + G_4 |3\rangle\langle 1| + H. c.)] \quad (4)$$

其中, $H. c.$ 是前面两项的厄米共轭量,把它表示成矩阵形式^[4]为:

$$H' = \hbar \begin{pmatrix} 0 & -G_2^* & -G_4^* \\ -G_2 & \Delta_2 & 0 \\ -G_4 & 0 & \Delta_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

设在缀饰态表象中的本征态可表示为:

$$\Psi = A_1 |1\rangle + A_2 |2\rangle + A_3 |3\rangle \quad (6)$$

而式(4)中的哈密顿量 H' 所满足的本征方程为:

$$H' \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

为了结果便于直观比较,在自然单位制下取 $\hbar = 1$, 可写出缀饰态表象下的久期方程为:

$$\begin{vmatrix} -\lambda & -G_2^* & -G_4^* \\ -G_2 & \Delta_2 - \lambda & 0 \\ -G_4 & 0 & \Delta_3 - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

为计算简单起见,取失谐 $\Delta_2 = 0, \Delta_3 = \Delta$ 得到方程:

$$\lambda^3 - \Delta\lambda^2 - (G_2^2 + G_4^2)\lambda + \Delta G_2^2 = 0 \quad (9)$$

使用卡丹公式法对方程进行求解,首先对于式(9)有 $a = 1, b = -\Delta, c = -(G_2^2 + G_4^2), d = \Delta G_2^2$, 令:

$$\begin{cases} p = (3ac - b^2)/3a^2 \\ q = (27a^2d - 9abc + 2b^3)/27a^3 \\ \delta = (q/2)^2 + (p/3)^3 \\ \omega = (-1 + \sqrt{3}i)/2 \end{cases} \quad (10)$$

那么本征方程的三个本征值就可以表示为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \omega \times \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{\delta}} + \omega^2 \times \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{\delta}} + \Delta/3 \\ \lambda_2 = \omega^2 \times \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{\delta}} + \omega \times \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{\delta}} + \Delta/3 \\ \lambda_3 = \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{\delta}} + \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{\delta}} + \Delta/3 \end{cases} \quad (11)$$

将本征值代入本征方程中,令 $A_2 = G_2$, 求解出系数分别 $A_1 = -\lambda_m, A_3 = G_4\lambda_m/(\lambda_m - \Delta) (m = 1, 2, 3)$ 。归一化后得到三个缀饰态能级表示为:

$$|\alpha_m\rangle = -(\lambda_m/A)|1\rangle + (G_2/A)|2\rangle + G_4\lambda_m/[A(\lambda_m - \Delta)]|3\rangle (m = 1, 2, 3) \quad (12)$$

其中, $A = \sqrt{\lambda_m^2 + G_2^2 + G_4^2\lambda_m^2/(\lambda_m - \Delta)^2}$ 。

由式(9)~(11)可知,缀饰能级 λ_1, λ_2 和 λ_3 随缀饰场的 Rabi 频率 G_2 和 G_4 的变化而变化,而 Rabi 频率 G_2 和 G_4 又决定于缀饰场 E_2 和 E_4 的功率,使得可以通过改变缀饰场功率来调控缀饰能级的位置。且由于缀饰能级同时与两个缀饰场的功率有关系,所以在改变一个缀饰场时,可以观察到三个缀饰能级同时移动的现象,这体现了两个缀饰场之间的相互作用。可以用 DFWM 信号 E_F 测量缀饰场间的这种相互作用。当扫描探测场失谐 Δ_1 时, FWM 信号表现为 Autler-Townes(AT) 分裂现象。而当 FWM 信号与缀饰能级发生单光子共振时, FWM 信号强度达到极大值,获得 AT 分裂的峰值位置。意味着, AT 分裂的峰值位置的移动正好反映出缀饰场间的相互作用。下面我们使用扫描探测场失谐的方式,通过改变缀饰场功率,研究双缀饰 FWM 信号的缀饰之间的相互作用。

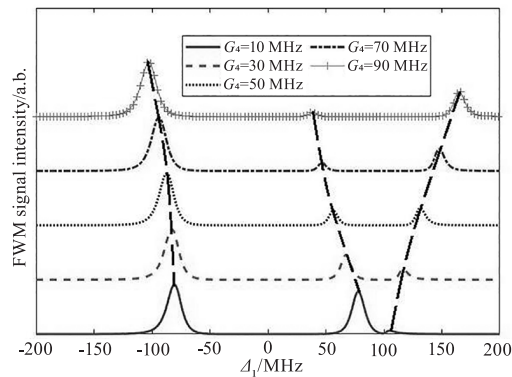
3 数值分析与讨论

3.1 大失谐处缀饰场 E_4 控制下的缀饰相互作用

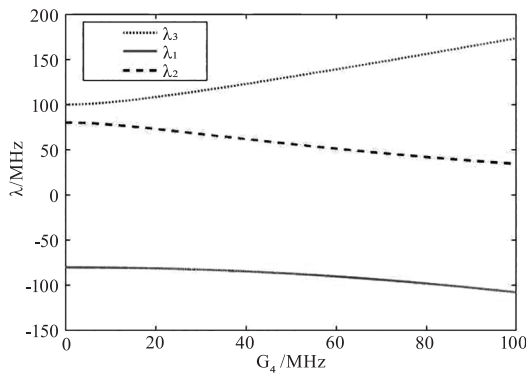
首先改变缀饰场 E_4 功率,扫描探测场失谐 Δ_1 , 研究缀饰场 E_4 功率对缀饰相互作用的影响。选择 E_2 失谐 $\Delta_2 = 0$ 及 E_4 失谐 $\Delta_3 = 100$ MHz 时研究该问题。计算使用的其他参数分别为 $G_1 = G'_1 = 5$ MHz, $G_3 = 1$ MHz, $G_2 = 80$ MHz, $\Gamma_{00} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{10} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{20} = 2\pi \times 0.535$ MHz, $\Gamma_{30} = 2\pi \times 0.535$ MHz。

如图 2(a) 所示,当扫描探测场失谐 Δ_1 时,可以观察到 FWM 信号的 AT 分裂的三峰结构。图 2(a) 中虚线给出了当缀饰场 E_4 功率增加时, FWM 信号 AT 分裂的峰值位置移动的情况,可以明显观察到在增加缀饰场 E_4 功率的过程中,三个峰的位置同时发

生变化,左峰和中峰的位置随着缀饰场功率的增大而发生向左的偏移,右峰的位置发生向右的偏移。这种偏移与图2(b)中缀饰能级 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 随 G_4 的变化曲线完全一致。



(a) 改变 G_4 , Δ_1 与FWM信号强度的关系曲线



(b) G_4 与本征值 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的关系曲线

图2 双缀饰场作用下,改变缀饰场 E_4 功率的模拟结果

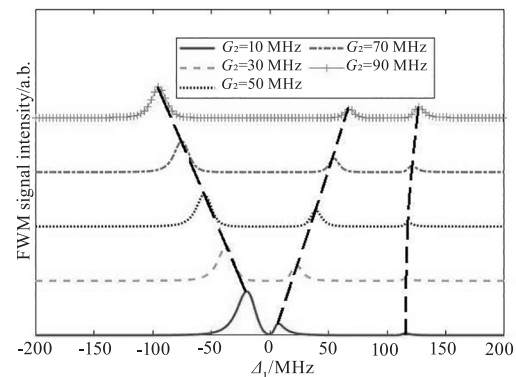
Fig. 2 The simulation result of changing the power of the dressing field E_4 under the effect of double dressing field

FWM信号的AT分裂峰值就是FWM与缀饰能级发生共振的位置。两个缀饰场产生三个缀饰能级,在外加缀饰场 E_2 和 E_4 的共同作用下能级耦合产生了三个新缀饰能级 $|\alpha_1\rangle$ 、 $|\alpha_2\rangle$ 和 $|\alpha_3\rangle$ 。当扫描探测场失谐 Δ_1 时,若依次满足 $\Delta_1 = \lambda_1$ 、 $\Delta_1 = \lambda_2$ 及 $\Delta_1 = \lambda_3$,则FWM信号分别与缀饰能级 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 共振,就可逐一获得AT分裂的左峰、中峰和右峰位置。缀饰能级 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 随 G_4 的变化函数如式(11)所示,变化曲线如图2(b)所示。在图2(b)中,当 G_4 由10 MHz增加到90 MHz时,缀饰能级 λ_1 是随 G_4 单调递增的, λ_2 和 λ_3 是随 G_4 单调递减的。这与图2(a)中FWM信号AT分裂的三个峰值位置随 G_4 的变化曲线完全一致。由此可知,当两个缀饰场 E_2 和 E_4 同时作用于非线性光学介质时,在大失

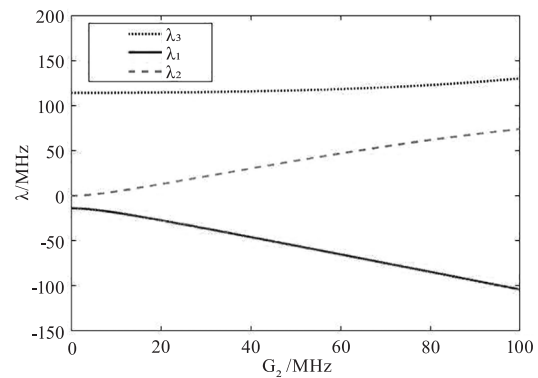
谐处可通过缀饰场 E_4 功率同时控制三个缀饰能级的位置即FWM信号AT分裂的峰值位置,FWM信号AT分裂的峰值位置同时决定于两个缀饰场 E_2 和 E_4 ,FWM信号AT分裂的峰值位置体现了两个缀饰场的缀饰相互作用的最终结果。

3.2 零失谐处缀饰场 E_2 控制下的缀饰相互作用

紧接着研究零失谐时缀饰场 E_2 对缀饰相互作用的影响。同样,改变缀饰场 E_2 功率,扫描探测场失谐 Δ_1 ,研究该问题。令 E_2 失谐 $\Delta_2 = 0$ 及 E_4 失谐 $\Delta_3 = 100$ MHz,计算使用的其他参数分别为计算使用的其他参数分别为 $G_1 = G'_1 = 5$ MHz, $G_3 = 1$ MHz, $G_4 = 40$ MHz, $\Gamma_{00} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{10} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{20} = 2\pi \times 0.535$ MHz, $\Gamma_{30} = 2\pi \times 0.535$ MHz。



(a) G_4 与本征值 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的关系曲线



(b) G_2 与本征值 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的关系曲线

图3 双缀饰场作用下,改变缀饰场 E_2 功率的模拟结果

Fig. 3 The simulation result of changing the power of the dressing field E_2 under the effect of double dressing field

图3(a)为改变缀饰场 E_2 功率,扫描探测场失谐 Δ_1 时FWM信号强度随 E_2 功率的变化曲线。图3(a)中虚线给出了当缀饰场 E_2 功率增加时,FWM信号AT分裂的峰值位置移动的情况。可以明显观察到在增加缀饰场 E_2 功率的过程中,三个峰的位置也同时发生移动,左峰的位置随着缀饰场功

率的增大而发生向左的偏移,中峰和右峰的位置发生向右的偏移。这种偏移与图 3(b)中缀饰能级 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 随 G_2 的变化曲线完全一致。

FWM 信号的 AT 分裂峰值位置对应着缀饰能级的位置。由图 3 可知,当两个缀饰场 E_2 和 E_4 同时作用于非线性光学介质时,在零失谐处也可通过缀饰场的功率同时改变三个缀饰能级的位置即 FWM 信号 AT 分裂的峰值位置。同时决定于缀饰场 E_2 和 E_4 的 FWM 信号 AT 分裂的峰值位置体现了两个缀饰场的缀饰相互作用。

虽然三个缀饰能级的位置同时受到某一个缀饰场功率的调制,但是可以发现,缀饰场对每一个缀饰能级位置的调制能力是不同的,这决定于缀饰场的失谐。相比于图 2(a)的大失谐,在缀饰场失谐为零失谐时,图 3(a)能更明显地观察到缀饰场 E_2 功率对每一个缀饰能级的作用是不同的。当零失谐时,缀饰场 E_2 功率发生相同的变化,FWM 信号 AT 分裂的左峰和中峰位置移动的更剧烈,而右峰则移动地更平缓一些。FWM 信号 AT 分裂峰值位置的移动反映了两个缀饰场的相互作用,说明缀饰能级的频率越靠近功率变化的缀饰场,缀饰场间的相互作用就越强烈。

3.3 同失谐时缀饰场 E_4 控制下的缀饰相互作用

最后研究在特殊情况下的缀饰场间的缀饰相互作用。取缀饰场 E_2 及 E_4 的失谐均为零失谐,计算使用的其他参数分别为 $G_1 = G'_1 = 5$ MHz, $G_3 = 1$ MHz, $G_2 = 40$ MHz, $\Gamma_{00} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{10} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{20} = 2\pi \times 0.535$ MHz, $\Gamma_{30} = 2\pi \times 0.535$ MHz。

如图 4(a)所示,扫描探测场失谐 Δ_1 时 FWM 信号只有两个峰。并且在增加 E_4 功率的过程中,这两个峰的偏移关于 $\Delta_1 = 0$ 是对称的。同样,图 4(a)和图 4(b)的结果完全一致。

当缀饰场 E_2 及 E_4 的失谐均为零失谐时,对于式(9)而言可取 $\Delta_3 = 0$,式(9)变形为:

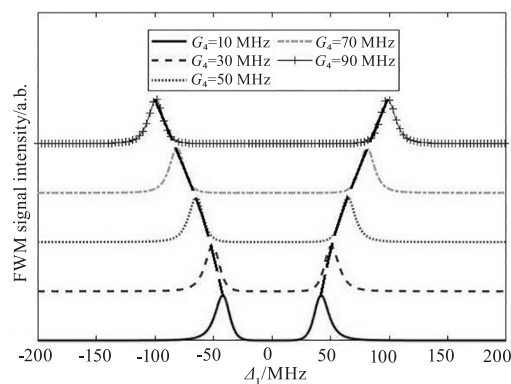
$$\lambda^2 - (G_2^2 + G_4^2) = 0 \quad (13)$$

求解式(13)可得两个缀饰场均为零失谐时的本征值如下式所示:

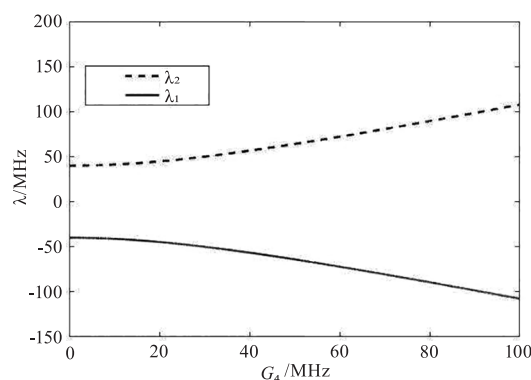
$$\begin{cases} \lambda_1 = -\sqrt{G_2^2 + G_4^2} \\ \lambda_2 = \sqrt{G_2^2 + G_4^2} \end{cases} \quad (14)$$

可知,当两个缀饰场失谐相同时,原子介质中只有两个缀饰能级产生。当两个缀饰场失谐均为零失谐时,缀饰能级的位置由式(14)确定。由式(14)可

知,缀饰能级的位置只和缀饰场的功率有关。并且,缀饰能级的位置关于 $\Delta_1 = 0$ 是对称的。式(14)中只有自变量 G_4 和 G_2 的独立项,没有相干项,意味着改变 G_4 或 G_2 对缀饰能级位置的影响是相同的。说明当两个缀饰场失谐相同时,两个缀饰场对非线性光学介质的作用效果与只有一个缀饰场作用时的效果是一样的,此时扫描探测场失谐 Δ_1 时,获得的是单缀饰 FWM 信号。



(a) 改变 G_4 , Δ_1 与 FWM 信号强度的关系曲线



(b) G_4 与本征值 λ_1 和 λ_2 的关系曲线

图 4 双缀饰场作用下,改变缀饰场 E_4 功率的模拟结果

Fig. 4 The simulation result of changing the power G_4 of the dressing field E_4

4 小结

本文通过改变缀饰场功率,扫描探测场失谐的方法研究了级联双缀饰 FWM 的缀饰相互作用。研究发现,当失谐不同的两个缀饰场同时作用于非线性光学介质时,会产生三个缀饰能级,这三个缀饰能级将同时受到两个缀饰场功率的影响,使得扫描探测场失谐得到的级联双缀饰 FWM 信号的 AT 分裂的峰值位置同时发生移动;并且峰值位置偏移的程度与缀饰场失谐有关;当两个缀饰场失谐相同时,缀饰作用等效于一个缀饰场单独缀饰的情形。此外,本文计算所使用的参数均为铷 85 的真实参数,因此可预测文中结论均可在实际中验证,这种功率灵活

操控的 FWM 信号可被广泛应用于量子纠缠及量子通信等领域。

参考文献:

- [1] Li Dongkang, Shen Huijuan. The coherence of a four-level atomic system is analyzed by the theory of dressed states [J]. Journal of Tonghua Normal University, 2011, 10 (32):30-31,43. (in Chinese)
李东康,沈慧娟.用缀饰态理论分析四能级原子系统的相干性[J].通化师范学院学报,2011,10(32):30-31,43.
- [2] Shi Sunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei, et al. Nonlinear optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
石顺祥,陈国夫,赵卫,等.非线性光学[M].西安:西安电子科技大学出版社,2012.
- [3] Wu Y, Deng L. Ultraslow optical solitons in a cold four-state medium [J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93 (14):143904.
- [4] Zhang Y P, Xiao M. Generalized dressed and doubly-dressed multi-wave mixing [J]. Opt. Express, 2007, 15 (12):7182-7189.
- [5] Lu B, Burkett W H, Xiao M. Nondegenerate four-wave mixing in a double-lambda system under the influence of coherent population trapping [J]. Opt. Lett., 1998, 23 (10):804-806.
- [6] Lukin M D, Yelin S F, Fleischhauer M, et al. Quantum interference effects induced by interacting dark resonances [J]. Phys. Rev. A, 1999, 60(4):3225-3228.
- [7] Yan M, Rickey E G, Zhu Y F. Observation of doubly dressed states in cold atoms [J]. Phys. Rev. A, 2001, 64 (1):013412.
- [8] Wang H, Goorskey D, Xiao M. Enhanced Kerr nonlinearity via atomic coherence in a three-level atomic system [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87(7):073601.
- [9] Field J E, Hahn K H, Harris S E. Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened lead vapor [J]. Phys. Rev. Lett., 1991, 67(26):3062-3065.
- [10] Li Y Q, Xiao M. Electromagnetically induced transparency in a three-level L-type system in rubidium atoms [J]. Phys. Rev. A, 1995, 51:2703-2714.
- [11] Sun J, Zuo Z C, Liu X, et al. Two-photon resonant four-wave mixing in a dressed atomic system [J]. Phys. Rev. A, 2004, 70(5):053820.
- [12] Zhang Y P, Anderson B, Xiao M. Coexistence of four-wave, six-wave and eight-wave mixing processes in multi-dressed atomic systems [J]. J. Phys. B, 2008, 41 (4):045502.
- [13] Piao M Z. The four-dimensional entangled state of two atoms is prepared based on the decorated state scheme [J]. Journal of Quantum Optics, 2020, 26(4):313-319. (in Chinese)
朴民哲.基于缀饰态方案制备两原子四维纠缠态[J].量子光学学报.2020,26(4):313-319.
- [14] Tian L, Sun L L, Zhu X Y, et al. Fast achievement of quantum state transfer and distributed quantum entanglement by dressed states [J]. Chinese Physics B. 2020, 29 (5):135-146.
- [15] Wang Dan, Guo Ruixiang, Dai Yupeng, et al. Dual-channel dual-band gain spectrum based on degenerate four-wave mixing [J]. Acta physica Sinica, 2021, 70(10):150-156. (in Chinese)
王丹,郭瑞翔,戴玉鹏,等.基于简并四波混频的双信道双频段增益谱[J].物理学报,2021,70(10):150-156.
- [16] Dai Pei, Cao Wenhua, Xu Ping. Several all-optical logic gates based on nonlinear effects and their development [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(6):593-597. (in Chinese)
戴培,曹文华,徐平.几种基于非线性效应的全光逻辑门及其发展[J].激光与红外,2010,40(6):593-597.
- [17] Gong Jiamin, Zhang Lihong, Hao Qianwen, et al. Effect of SRS on gain performance of fiber optic parametric amplifiers based on FWM [J]. Laser & Infrared, 2021, 51 (7):877-882. (in Chinese)
巩稼民,张丽红,郝倩文,等.SRS对基于FWM的光纤参量放大器增益性能的影响[J].激光与红外,2021,51(7):877-882.
- [18] Fu Jing, Wang Xutong, Liu Shengsuai, et al. Nonlinear interferometer based on optical parametric amplifier feedback [J]. Laser & Optoelectronics Progress. 2023, 60 (11):1106021. (in Chinese)
符婧,王绪彤,刘胜帅,等.基于光学参量放大器反馈的非线性干涉仪[J].激光与光电子学进展,2023,60(11):1106021.
- [19] Li Xiang, Li Peiying. Controlling the transition of bright and dark states via dressing effect and phase of the coupling field [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52 (5):051901. (in Chinese)
李祥,李培英.耦合场缀饰效应和相位调控明暗态转换[J].激光与光电子学进展,2015,52(5):051901.
- [20] Nie Z, Zheng H, Zhang Y, et al. Experimental demonstration of optical switching and routing via four-wave mixing spatial shift [J]. Optics Express, 2010, 18(2):899-905.
- [21] Scully M O, Zubairy M S. Quantum optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997:193-219.