

多缀饰四波混频 Autler-Townes 分裂的相干控制

桑苏玲*

宁夏师范学院物理与电子信息工程学院纳米结构及功能材料工程技术研究中心, 宁夏 固原 756000

摘要 主要研究了多缀饰四波混频 Autler-Townes (AT) 分裂的相干控制。通过控制外加缀饰场的数量使四波混频信号由单缀饰向级联双缀饰转变, 其中单缀饰和双缀饰四波混频信号通过扫描探测场失谐可以观察到 AT 分裂现象, 并且在双缀饰四波混频信号中观察到了二级 AT 分裂现象。最后分析了 AT 分裂位置和宽度的影响因素。研究表明, 通过控制缀饰场 Rabi 频率和失谐可实现 AT 分裂位置和宽度的相干控制。

关键词 非线性光学; 四波混频; Autler-Townes 分裂; 缀饰态; 电磁诱导透明

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.081901

Coherent Control of Multi-Dressed Four-Wave Mixing Autler-Townes Splitting

Sang Suling*

Engineering Research Center of Nanostructure and Functional Materials, College of Physics and Electronic Information Engineering, Ningxia Normal University, Guyuan, Ningxia 756000, China

Abstract The coherent control of multi-dressed four-wave mixing (FWM) Autler-Townes (AT) splitting is mainly investigated. It is shown that the transformation of the FWM signals from singly-dressing to cascade doubly-dressing is realized by controlling the quantity of the additional dressing fields. Moreover, the AT splitting phenomena of the singly-dressed or doubly-dressed FWM signals can be observed when the frequency detuning of probe field is scanned. The second-order AT splitting phenomena of the doubly-dressed FWM signal is also observed. The factors influencing the position and linewidth of AT splitting are finally analyzed. The research results show that the position and linewidth of AT splitting can be coherently controlled by Rabi frequency or frequency detuning of the dressing field.

Key words nonlinear optics; four-wave mixing; Autler-Townes splitting; dressed states; electromagnetically induced transparency

OCIS codes 190.4380; 300.2570; 270.1670

1 引言

相干激光场诱导的电磁诱导透明(EIT)是光与物质相互作用时表现出来的非线性量子相干效应, 这种现象已经引起了许多学者的关注^[1-2], 因为此时弱信号场几乎可以无吸收地通过共振介质。而且 EIT 现象的研究也极大地推动无反转激光^[3]、光速减慢^[4]、光控制和信息存储^[5-6]、量子通信^[7]、非线性光学^[8]和四波混频(FWM)^[9-10]等物理现象的研究。

欧特莱-汤斯(Autler-Townes, AT)分裂, 也称作 AC Stark 效应, 是指强激光场共振作用于原子或分子跃迁时产生的谱线分裂的现象, 其物理实质是强控制场诱导的分离缀饰态出现的结果。当前, AT 分裂已经在原子分子系统^[11-12]、量子点^[13]、超导量子电路^[14]中得到了广泛的研究, 其研究成果被用于超导量子比特^[11,15]、电偶极矩的测量^[16-17]、空间成像测量^[18]等方面。

本文通过改变缀饰场的数量实现了 FWM 信

收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2018-10-29; 录用日期: 2018-11-01

基金项目: 宁夏高等学校科学研究项目(NGY2017188)、宁夏自然科学基金(NZ17254)

* E-mail: slsangbm@163.com

号从单缀饰向双缀饰的转变,同时扫描探测场失谐观察到了一级和二级 AT 分裂。计算结果表明,改变缀饰场参量可以实现对两级 AT 分裂的灵活控制。

2 基本理论

能级系统及空间配置如图 1 所示。跃迁于 $|0\rangle$ 能级到 $|1\rangle$ 能级的两束抽运场 $\mathbf{E}_1(\omega_1, \mathbf{k}_1)$ 、 $\mathbf{E}'_1(\omega_1, \mathbf{k}'_1)$ 和一束探测场 $\mathbf{E}_3(\omega_1, \mathbf{k}_3)$ 有相同的失谐 $\Delta_1 = \Omega_{10} - \omega_1$, 其中 Ω_{10} 为 $|0\rangle$ 能级到 $|1\rangle$ 能级的共振频率, \mathbf{k} 为波矢, ω 为角频率。跃迁于 $|1\rangle$ 能级到 $|2\rangle$ 能级间的缀饰场 $\mathbf{E}_2(\omega_2, \mathbf{k}_2)$ 失谐为 $\Delta_2 = \Omega_{21} - \omega_2$, 其中 Ω_{21} 为 $|1\rangle$ 能级到 $|2\rangle$ 能级的共振频率。而另一个缀饰场 $\mathbf{E}_4(\omega_3, \mathbf{k}_4)$ 同样存在 $|0\rangle$ 能级和 $|1\rangle$ 能级之间的跃迁, 失谐为 $\Delta_3 = \Omega_{10} - \omega_3$ 。Rabi 频率定义如下: $G_i = \mu_{mn} E_i / \hbar$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 其中 μ_{mn} 为能级 $|m\rangle$ 和 $|n\rangle$ 之间的跃迁偶极矩, E_i 为电场强度, \hbar 为归一化普朗克常数。抽运场 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}'_1 及缀饰场 \mathbf{E}_2 和 \mathbf{E}_4 沿 z 轴方向传播, 而探测场 \mathbf{E}_3 的方向和它们是相反的。 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}'_1 之间有很小的夹角, 使得满足相位匹配条件 $\mathbf{k}_F = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}'_1 + \mathbf{k}_3$ 的简并四波混频 (DFWM) 信号场 $\mathbf{E}_F(\omega_1, \Delta_1 = \Omega_{10} - \omega_1$ 和 $G_F = \mu_{10} E_F / \hbar$) 沿与 \mathbf{E}'_1 相反的方向传播。

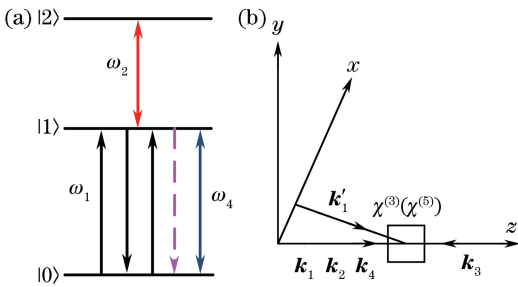


图 1 能级系统及空间配置。(a) 级联三级系统能级图; (b) 相位配置

Fig. 1 Related energy-level system and geometric configuration. (a) Energy-level of cascade three-level system; (b) phase-matching configuration

对 DFWM 信号场 \mathbf{E}_F 来说, 它的产生过程可以分解为四步跃迁过程: 第一步是 $|0\rangle$ 能级到 $|1\rangle$ 能级的跃迁过程, 此过程吸收一个抽运场 \mathbf{E}_1 的光子; 第二步是 $|1\rangle$ 能级到 $|0\rangle$ 能级的跃迁过程; 第三步又是一个 $|0\rangle$ 能级到 $|1\rangle$ 能级的跃迁过程, 此时吸收一个探测场 \mathbf{E}_3 的光子, 最后一个是 $|1\rangle$ 能级到 $|0\rangle$ 能级的跃迁过程, 发出一个频率为 ω_1 的 FWM 光子。在偶极近似的条件下, 此系统的相互作用哈密顿算符^[19]为

$$H_1 = \hbar \Delta_1 |1\rangle\langle 1| - \hbar \{ G_3 \exp(i\mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}) |1\rangle\langle 0| + [G_1 \exp(i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}) |1\rangle\langle 0| + G'_1 \exp(i\mathbf{k}'_1 \cdot \mathbf{r}) \times |1\rangle\langle 0|] + \text{H.c.} \}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 为空间某点的位置矢量; H.c. 为前面所有量的厄米共轭量。结合密度矩阵方程 $(\partial \rho / \partial t) = (1/i\hbar) [H_1, \rho] - \Gamma \rho$ 及 DFWM 信号场的 Liouville 路径 $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{G_1} \rho_{10}^{(1)} \xrightarrow{(G'_1)^*} \rho_{00}^{(2)} \xrightarrow{G_3} \rho_{10}^{(3)}$, 可得三阶密度矩阵元为

$$\rho_{10}^{(3)} = \frac{g}{\Gamma_{00} d_1^2}, \quad (2)$$

其中: ρ 为密度矩阵; H_1 为哈密顿量; Γ 为弛豫系数矩阵; $g = -iG_3 G_1 (G'_1)^*$, $(G'_1)^*$ 为 G'_1 的共轭; $d_1 = i\Delta_1 + \Gamma_{10}$, 为信号产生项, Γ_{ij} 为 $|i\rangle$ 能级与 $|j\rangle$ 能级之间的横向弛豫系数。

当缀饰场 \mathbf{E}_2 场缀饰 DFWM 信号, 对应的 DFWM 信号 Liouville 路径为 $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{G_1} \rho_{G_2 \pm 0}^{(1)} \xrightarrow{(G'_1)^*} \rho_{00}^{(2)} \xrightarrow{G_3} \rho_{G_2 \pm 0}^{(3)}$, 可以求得单缀饰 FWM 信号密度矩阵元表达式为

$$\rho_{10}^{(3)} = \frac{g}{\Gamma_{00} (d_1 + |G_2|^2 / d_2)^2}, \quad (3)$$

式中: $d_2 = \Gamma_{20} + i(\Delta_1 + \Delta_2)$; 双光子项 $|G_2|^2 / [\Gamma_{20} + i(\Delta_1 + \Delta_2)]$ 为 \mathbf{E}_2 起缀饰作用的单缀饰项。

当 \mathbf{E}_2 和 \mathbf{E}_4 同时作用于 DFWM 信号场时, 可以得到级联双缀饰的 DFWM 信号, 此信号的 Liouville 路径为 $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{G_1} \rho_{(G_2 \pm G_4 \pm 0)}^{(1)} \xrightarrow{(G'_1)^*} \rho_{00}^{(2)} \xrightarrow{G_3} \rho_{(G_2 \pm G_4 \pm 0)}^{(3)}$, 求得的三阶密度矩阵元的形式为

$$\rho_{10}^{(3)} = \frac{g}{\Gamma_{00} (d_1 + |G_2|^2 / d_2 + |G_4|^2 / d_3)^2}, \quad (4)$$

式中: $d_3 = \Gamma_{00} + i(\Delta_1 - \Delta_3)$; 双光子项 $|G_4|^2 / [\Gamma_{00} + i(\Delta_1 - \Delta_3)]$ 为对 \mathbf{E}_4 起缀饰作用的缀饰项。FWM 信号的强度 I_F 正比于 $|\rho_{10}^{(3)}|^2$ 。

3 数值分析与讨论

3.1 简并四波混频

在建立了上述理论模型后, 研究了不同缀饰作用的 DFWM 信号。首先研究无缀饰作用的 DFWM 信号。此时, 信号强度由 (2) 式给出。计算使用的参数为 $G_1 = G'_1 = 5$ MHz, $G_3 = 1$ MHz, $G_2 = 0$ MHz, $\Gamma_{00} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{10} = 2\pi \times 3$ MHz, Δ_1 与 DFWM 信号强度的关系曲线如图 2(a) 可知, 图中 DFWM 信号强度的最大值归一为 1。由图 2(a) 可知, 扫描探测场失谐 Δ_1 时, 在 $\Delta_1 < 0$ 的区域, 随着

Δ_1 的增大,DFWM 的信号强度急剧增大;而在 $\Delta_1 > 0$ 的区域,随着 Δ_1 的增大,DFWM 的信号强度急剧减小;在 $\Delta_1 = 0$ 处,当探测场与 $|1\rangle$ 能级实现单光子共振即满足单光子共振条件 $\Delta_1 = 0$ 时[如图 2(b)所示],DFWM 的信号强度达到其最大值。这种单光子共振现象同时也可体现在(2)式中的单光子项($i\Delta_1 + \Gamma_{10}$)中。

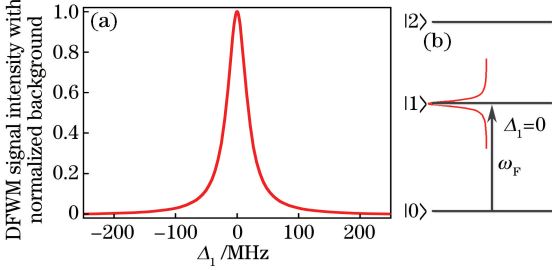


图 2 DFWM 信号的模拟结果。(a) Δ_1 与 DFWM 信号强度的关系曲线;(b) DFWM 信号系统能级图
Fig. 2 Simulation results of DFWM signal. (a) Δ_1 versus DFWM signal intensity; (b) energy-level diagram of DFWM signal system

3.2 单缀饰四波混频

研究不同缀饰场失谐 Δ_2 、扫描探测场失谐 Δ_1 下单缀饰 DFWM 信号的变化规律。此时,信号强度由(3) 式给出。计算使用的参数分别为 $G_1 = G'_1 = 5$ MHz, $G_3 = 1$ MHz, $G_2 = 55$ MHz, $\Gamma_{00} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{10} = 2\pi \times 3$ MHz, $\Gamma_{20} = 2\pi \times 0.535$ MHz。单缀饰 DFWM 信号的模拟结果如图 3 所示。首先研究了单缀饰 DFWM 信号随探测场失谐 Δ_1 和缀饰场失谐 Δ_2 的变化规律,模拟结果如图 3(a)所示。图 3(b)给出了改变缀饰场失谐 Δ_2 、扫描探测场失谐 Δ_1 时, Δ_1 与 DFWM 信号强度的关系曲线。扫描探测场失谐 Δ_1 时,单缀饰 DFWM 信号表现出一级 AT 分裂现象。在图 3(b)中,改变缀饰场失谐时,可以观察到 AT 分裂的位置和宽度发生变化。AT 分裂及其变化,可利用(3)式中的双光子缀饰项 $|G_2|^2 / [\Gamma_{20} + i(\Delta_1 + \Delta_2)]$ 进行说明。由双光子缀饰项可看出,AT 分裂的中心位置需满足双光子共振条件 $\Delta_1 + \Delta_2 = 0$,所以,当改变缀饰场失谐 Δ_2 时,AT 分裂的中心位置也会发生变化。

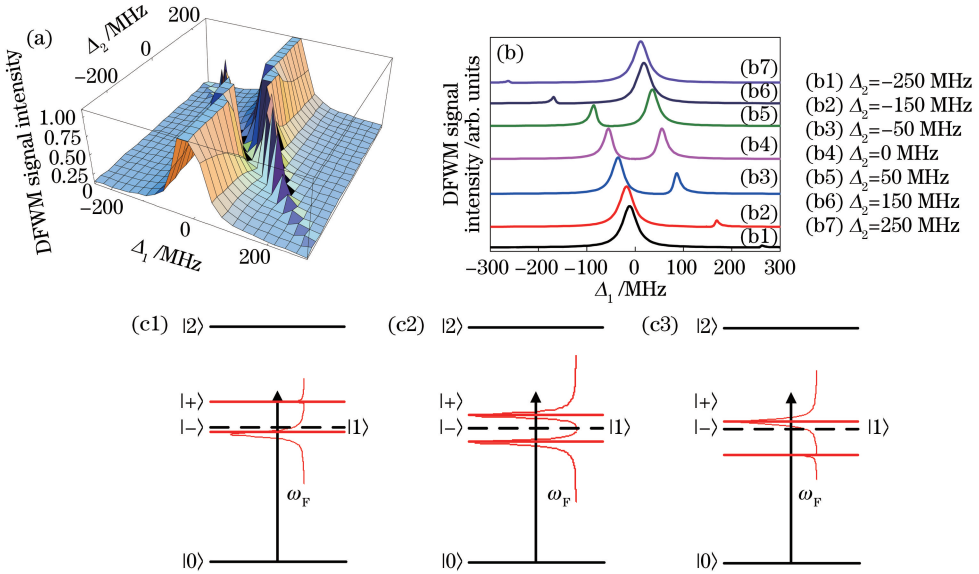


图 3 单缀饰 DFWM 信号的模拟结果。(a) Δ_1 、 Δ_2 与 DFWM 信号强度的关系曲线;(b) 不同的 Δ_2 处, Δ_1 与 DFWM 信号强度的关系曲线;(c) DFWM 信号系统能级图,(c1) $\Delta_2 = -150$ MHz;(c2) $\Delta_2 = 0$ MHz;(c3) $\Delta_2 = 150$ MHz
Fig. 3 Simulation results of singly-dressed DFWM signal. (a) Δ_1 , Δ_2 versus DFWM signal intensity; (b) Δ_1 versus DFWM signal intensity at different Δ_2 ; (c) energy-level diagrams of DFWM signal system for (c1) $\Delta_2 = -150$ MHz, (c2) $\Delta_2 = 0$ MHz and (c3) $\Delta_2 = 150$ MHz

上述的扫描结果也可以通过缀饰态模型得到解释。如图 3(c)所示,缀饰场 E_2 作用在 $|1\rangle$ 能级上,将 $|1\rangle$ 能级分裂为缀饰能级 $|\pm\rangle$,可以用本征方程 $H'|\pm\rangle = \lambda_{\pm}|\pm\rangle$ 进行描述,其中 $H' = \hbar \times [\Delta_2|2\rangle\langle 2| - (G_2|2\rangle\langle 1| + \text{H.c.})]$ 为 $|1\rangle - |2\rangle$ 子能

级系统的相互作用哈密顿算符,由此便可以得到缀饰态的本征态和本征值(从 $|1\rangle$ 能级开始测量)为

$$|\pm\rangle = \sin \theta_{\pm} |1\rangle + \cos \theta_{\pm} |2\rangle, \quad (5)$$

$$\lambda_{\pm} = \frac{\Delta_2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\Delta_2^2 + 4G_2^2},$$

式中: $\sin \theta_{\pm} / \cos \theta_{\pm} = (\Delta_2 - \lambda_{\pm}) / G_2$ 。由(5)式可以看出, 缀饰能级 $|+\rangle$ 及 $|-\rangle$ 的位置会随着缀饰场失谐 Δ_2 发生变化。当探测场与缀饰能级 $|+\rangle$ 及 $|-\rangle$ 发生单光子共振时, 即满足条件 $\Delta_1 + \lambda_+ = 0$ 或 $\Delta_1 + \lambda_- = 0$ 时, 就可以观察到 AT 分裂的两个峰值位置, 其中左峰是与 $|+\rangle$ 共振形成的, 此时满足条件 $\Delta_1 + \lambda_+ = 0$; 右峰是与 $|-\rangle$ 共振形成的, 满足条件 $\Delta_1 + \lambda_- = 0$ 。而 AT 分裂宽度应等于缀饰能级 $|+\rangle$ 及 $|-\rangle$ 之间的距离 $\sqrt{\Delta_2^2 + 4G_2^2}$, 这也说明 AT 分裂宽度随 Δ_2 和 G_2 的变化而变化[如图 3(b)所示]。当缀饰场失谐 Δ_2 为小失谐时, AT 的分裂宽度约等于 $2G_2$ 。

3.3 双缀饰简并四波混频

接着研究不同缀饰场失谐 Δ_2 及 Δ_3 处, 扫描探测场失谐 Δ_1 时, E_2 和 E_4 级联双缀饰 DFWM 信号的变化规律。此时, 信号强度由(4)式给出。计算使用的参数分别为 $G_1 = G_1' = 5$ MHz, $G_3 = 1$ MHz, $G_2 = 55$ 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。为了简化, 研究 E_2 和 E_4 级联双缀饰 DFWM 信号时, 令 E_2 缀饰场失谐 $\Delta_2 = 0$ 。双缀饰 DFWM 信号的模拟结果如图 4 所示。在 $\Delta_2 =$

0 时, E_4 缀饰场 Δ_3 取不同值, 扫描探测场失谐 Δ_1 时, Δ_1 与 FWM 信号强度的关系曲线如图 4(a)所示。在图 4(a)中, 可以观察到一级[(a1)、(a2)、(a3)的右峰和(a5)、(a6)及(a7)中的左峰]和二级 AT 分裂 [(a1)、(a2)、(a3)的左侧双峰和(a5)、(a6)及(a7)的右侧双峰], 其中一级 AT 分裂由 E_2 缀饰场产生, 而二级 AT 分裂由 E_4 缀饰场产生。在图 4(a)中, 可以观察到两级 AT 分裂的位置和宽度会随着 E_4 缀饰场失谐发生变化。这可由(4)式级联双缀饰 DFWM 信号密度矩阵元表达式中的双光子缀饰项 $|G_2|^2 / [\Gamma_{20} + i(\Delta_1 + \Delta_2)]$ 和 $|G_4|^2 / [\Gamma_{00} + i(\Delta_1 - \Delta_3)]$ 体现出来。

同样, 上述的扫描结果也可以通过缀饰态模型得到解释。如图 4(b)所示, 缀饰场 E_2 和 E_4 同时作用在 $|1\rangle$ 能级上, 一级缀饰场 E_2 先将 $|1\rangle$ 能级分裂为缀饰能级 $|\pm\rangle$, 随后二级缀饰场 E_4 又将缀饰能级 $|+\rangle$ 或 $|-\rangle$ 分裂为二级缀饰态 $|+\pm\rangle$ 或 $|-\pm\rangle$ 。此时二级缀饰场 E_4 究竟分裂 $|+\rangle$ 还是 $|-\rangle$ 取决于 E_4 场的失谐 Δ_3 的大小。当 $\Delta_3 < 0$ 时, 二级缀饰场 E_4 分裂 $|+\rangle$, 产生二级缀饰态 $|++\rangle$ 及二级缀饰态 $|+-\rangle$, 对应图 4(b1)所示, 此时扫描探测场失谐 Δ_1 可以探测到依次由二级缀饰态 $|++\rangle$ 及 $|+-\rangle$ 和一级缀饰态 $|-\rangle$ 产生的三峰结构, 如图 4(a)中 (a1)、(a2)、(a3)所示; 当 $\Delta_3 > 0$ 时, 二级缀饰场 E_4 分裂 $|-\rangle$, 产生二级缀饰态 $|--\rangle$ 及 $| -+\rangle$ [如图 4(b3)所示]。此时扫描探测场失谐 Δ_1 可以探测到依次由一级缀饰态 $|+\rangle$ 和二级缀饰态 $| -+\rangle$ 及 $| --\rangle$ 产生的三峰结构, 如图 4(a)中 (a5)、(a6)及 (a7)所示。其中本征值的计算方法和单缀饰相同, 这里不再赘述。

4 结 论

通过改变外加缀饰场的数量使得 FWM 信号由无缀饰 FWM 信号、单缀饰 FWM 信号向级联双缀饰 FWM 信号转变。单缀饰 FWM 信号和双缀饰 FWM 信号在扫描探测场失谐可以观察到 AT 分裂现象, 并且在双缀饰 FWM 信号中观察到了二级 AT 分裂现象。通过计算, 发现 AT 分裂的位置和宽度取决于缀饰场 Rabi 频率和失谐。另外, 理论计算使用的参数是铷 85 原子的真实参数, 可以预见所有研究结论都可以在实验中观测到。这种对 FWM 信号进行灵活控制的方法, 可以构成全光开关的与门和或门, 用于制作光通信及光计算的单元器件。

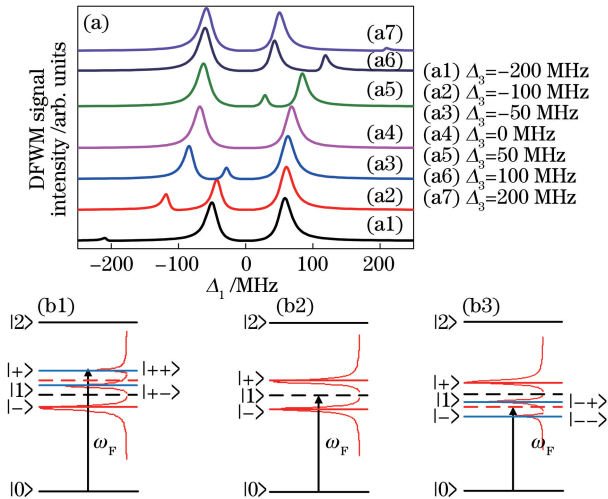


图 4 双缀饰 DFWM 信号的模拟结果。(a) 固定 $\Delta_2 = 0$ MHz, 改变的 Δ_3 , Δ_1 与 FWM 信号强度关系曲线; (b) FWM 信号系统能级图, $\Delta_2 = 0$ MHz; (b1) $\Delta_3 = -100$ MHz; (b2) $\Delta_3 = 0$ MHz; (b3) $\Delta_3 = 100$ MHz

Fig. 4 Simulation results of doubly-dressed DFWM signal. (a) Δ_1 versus FWM signal intensity under different Δ_3 at $\Delta_2 = 0$ MHz; (b) energy-level diagrams of FWM signal system at $\Delta_2 = 0$ MHz for (b1) $\Delta_3 = -100$ MHz, (b2) $\Delta_3 = 0$ MHz and (b3) $\Delta_3 = 100$ MHz

参 考 文 献

- [1] Harris S E. Electromagnetically induced transparency [J]. *Physics Today*, 1997, 50(7): 36-42.
- [2] Gea-Banacloche J, Li Y Q, Jin S Z, *et al.* Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media: Theory and experiment [J]. *Physical Review A*, 1995, 51(1): 576-583.
- [3] Imamoglu A, Harris S E. Lasers without inversion: interference of dressed lifetime-broadened states [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(24): 1344-1346.
- [4] 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(6720): 594-598.
- [5] Liu C E, 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(6819): 490-493.
- [6] Li G S, Yan F P, Wang W, *et al.* Analysis of photosensitive tunable multiband electromagnetically induce transparency in metamaterials [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0114002.
李广森, 延凤平, 王伟, 等. 光敏可调的多波段电磁诱导透明超材料分析 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0114002.
- [7] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, *et al.* Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics [J]. *Nature*, 2001, 414(6862): 413-418.
- [8] Liu Y T, Niu Y P, Lin G W, *et al.* Enhancement of fifth-order nonlinearity induced by atomic coherence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0719002.
刘羽桐, 钮月萍, 林功伟, 等. 原子相干引起的五阶非线性增强 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0719002.
- [9] Lukin M D, Matsko A B, Fleischhauer M, *et al.* Quantum noise and correlations in resonantly enhanced wave mixing based on atomic coherence [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(9): 1847.
- [10] Li X, Li P Y. 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.
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.
- [11] Zhang H, Wang L M, Chen J, *et al.* Autler-Townes splitting of a cascade system in ultracold cesium Rydberg atoms [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(3): 033835.
- [12] Zhang Y P, Li P Y, Zheng H B, *et al.* Observation of Autler-Townes splitting in six-wave mixing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7769-7777.
- [13] Xu X, Sun B, Berman P R, *et al.* Coherent optical spectroscopy of a strongly driven quantum dot [J]. *Science*, 2007, 317(5840): 929-932.
- [14] Cho S U, Moon H S, Chough Y T, *et al.* Quantum coherence and population transfer in a driven cascade three-level artificial atom [J]. *Physical Review A*, 2014, 89(5): 053814.
- [15] Baur M, Filipp S, Bianchetti R, *et al.* Measurement of Autler-Townes and Mollow transitions in a strongly driven superconducting qubit [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(24): 243602.
- [16] Ahmed E, Hansson A, Qi P, *et al.* Measurement of the electronic transition dipole moment by Autler-Townes splitting: Comparison of three- and four-level excitation schemes for the $\text{Na}_2 A^1 \Sigma_u^+ - X^1 \Sigma_g^+$ system [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2006, 124(8): 084308.
- [17] Piotrowicz J, MacCormick C, Kowalczyk A, *et al.* Measurement of the electric dipole moments for transitions to rubidium Rydberg states via Autler-Townes splitting [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(9): 093012.
- [18] Gordon J A, Holloway C L, Schwarzkopf A, *et al.* Millimeter wave detection via Autler-Townes splitting in rubidium Rydberg atoms [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(2): 024104.
- [19] Scully M O, Zubairy M S. *Quantum optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 193-219.