

# 五能级原子开放系统中的多波混频共存特性\*

沈磊剑<sup>1)</sup> 杜贻刚<sup>1)</sup> 李创社<sup>1)</sup> 张彦鹏<sup>1)†</sup> 聂志强<sup>1)</sup> 左翠翠<sup>1)</sup> 甘琛利<sup>1)</sup> 郑淮斌<sup>1)</sup> 卢克清<sup>3)</sup>

1) 西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室 西安 710049)

2) Department of Physics, University of Arkansas, Fayetteville 72701, USA)

3) 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室 西安 710068)

(2007 年 11 月 28 日收到 2008 年 8 月 13 日收到修改稿)

研究了受强缀饰场作用的五能级原子系统所产生的多波混频共存特性. 研究发现, 通过调节激光束方向, 沿同一方向出射的八波混频、双缀饰四波混频和单缀饰六波混频信号因共用能级的原子相干产生而出现竞争现象, 通过控制缀饰场减弱四波混频和六波混频信号强度, 可以达到增强八波混频信号的目的. 还对级联和并联两种不同缀饰方式下双缀饰四波混频过程的差别进行了详细分析.

关键词: 双缀饰四波混频, 单缀饰六波混频, 八波混频, 抑制增强

PACC: 4250, 3280, 4265

## 1. 引 言

近年来, 大量的理论和实验研究围绕原子相干对非线性光学效应的影响而展开<sup>[1-9]</sup>, 分别从不同方向对原子相干效应做了卓有成效的研究. Harris 等<sup>[1]</sup>提出电磁感应透明(EIT). 由于 EIT 可导致介质的线性与非线性极化率发生极大的变化, 使介质具有一些独特的光学性质而成为物理学研究中的一个新热点. 孙江等<sup>[9]</sup>理论研究了级联四能级系统中双光子工作非简并四波混频由于加入耦合光场而产生的量子干涉效应. Lukin 等<sup>[4]</sup>研究了 EIT 作用下的原子能级系统, 解释了特定能级中由两个强耦合场作用造成的能级分裂. 文献[5]从实验上得到了两个强耦合场作用下的三能级原子系统产生的三峰光谱图, 与理论推导的结果符合很好.

通常情况下, 由于强度远小于低阶混频信号, 加上多波混频信号的相互干扰, 很难检测到高阶混频信号. 但是通过原子相干和多光子量子干涉的方式, 例如耦合原子系统的中间能级到一个高激发态, 可以有选择地增强或抑制双光子激发<sup>[6-8]</sup>, 从而使共存的高阶混频信号强度增强到接近甚至大于低阶混

频信号强度.

本文研究了五能级原子系统中的多波混频在两个强耦合场作用下发生的量子干涉效应, 解释了产生的双缀饰四波混频(dual-dressed four-wave mixing, DDFWM)、单缀饰六波混频(dressed six-wave mixing, DSWM)以及八波混频(eight-wave mixing, EWM)的共存和竞争以及 DDFWM 信号和 DSWM 抑制与增强机制. 详细分析了并联和级联两种不同双缀饰情况下产生的四波混频(four-wave mixing, FWM)过程的区别, 以及各自原子能级分裂的形式. 理论推导得到弱耦合场下 DDFWM 信号相当于 FWM、六波混频(six-wave mixing, SWM)和八波混频(EWM)叠加作用. 通过调节激光束方向, 沿同一方向出射的 EWM、DDFWM 和 DSWM 信号因由共同能级的原子相干产生而相互发生竞争现象, 通过控制缀饰场减弱 FWM 和 SWM 信号强度, 可以达到增强八波混频信号的目的.

## 2. 基本理论

五能级系统有着很多种具体的形式, 各种形式之间又各有异同. 对五能级系统双缀饰 FWM 现象

\* 国家自然科学基金(批准号: 60308002, 60678005)、全国博士学位论文作者专项基金(批准号: 200339)、教育部科学技术研究重点项目(批准号: 105156)、新世纪优秀人才支持计划(批准号: 08-0431)、霍英东教育基金会高等院校青年教师基金(批准号: 101061)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20050698017)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ypzhang@mail.xjtu.edu.cn

的研究以图 1(a)所示的能级结构为例来分析.图 1(a)中  $|0\rangle$  和  $|4\rangle$  能级为基态,  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$  和  $|3\rangle$  能级为激发态.能级  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$ ,  $|0\rangle$  和  $|2\rangle$  及  $|2\rangle$  和  $|3\rangle$ ,  $|4\rangle$  和  $|2\rangle$  间的共振频率和偶极矩分别为  $\Omega_i$  和  $\mu_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ).

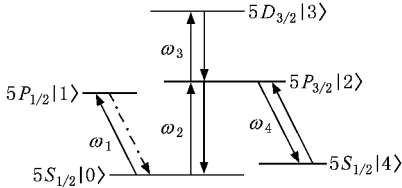


图 1 五能级系统能级图(FWM, SWM, EWM 共存)

抽运光的相位共轭几何配置如图 1(b)所示, 激光场  $E_i$  和  $E'_i$  ( $i = 2, 3, 4$ ) 具有同样的频率, 分别沿着光束 2 和光束 3 的方向传播(光束 2 和光束 3 之间有一个很小的角度, 约为  $0.3^\circ$ ), 而较弱的探测光  $E_1$  沿着光束 1 的方向(与光束 2 的方向相反)入射. 信号光 4 将会从满足相位匹配条件的方向射出. 当  $\omega_i \approx \Omega_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 时, 则  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  和  $\omega_3$ ,  $\omega_4$  将分别驱动  $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ ,  $|0\rangle \rightarrow |2\rangle$  及  $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ ,  $|2\rangle \rightarrow |4\rangle$  的跃迁, 从而感生  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|3\rangle$  和  $|4\rangle$  态两两之间的原子相干, 产生 16 个 EWM 信号. 此外, 五能级中的态  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  可构成三能级子系统, 产生 4 个 FWM 信号;  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$  和  $|3\rangle$  态,  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$  和  $|4\rangle$  态可分别构成 2 个四能级子系统, 分别产生 6 个 SWM 信号. 因此, 五能级系统中共存有 FWM, SWM 和 EWM 信号.

本文采用微扰链的方法来表示跃迁和相干过程, 微扰链是刘维空间耦合表示. 微扰链中的每一个密度矩阵元代表刘维空间中的一个位置, 密度矩阵

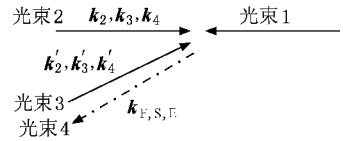


图 2 相位共轭几何配置图

元第一个和第二个下标分别代表左矢和右矢的“轴”.正频率和负频率电场在左矢“轴”上对应激发粒子向上和向下跃迁, 而在右矢“轴”上对应激发向下和向上跃迁.在用密度矩阵元表述的微扰链中, 每一个特定场的作用都转化为密度矩阵元左矢或右矢的变化. 所以 FWM, SWM 和 EWM 过程都可以用微扰链来表示, 产生的每个混频信号对应有一条微扰链.

下面考虑挡住不同场时产生混频信号的情形.

1) 挡住  $E'_3, E'_4$  场, 增强  $E_3, E_4$  场. 如图 3 所示, 增强  $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$  之间的  $E_3$  场和  $|2\rangle \rightarrow |4\rangle$  的  $E_4$  场可产生如并联和级联型的 DDFWM. 用在 FWM 微扰链上的下角标 2 被  $G_{3\pm}$  和  $G_{4\pm}$  替代来表示  $|2\rangle$  态受缀饰场作用的变化过程. 这样原 4 条 FWM 微扰链演化为 12 条 DDFWM 微扰链. 这 12 个 DDFWM 信号满足相位匹配条件  $k_F$  (表 1), 其中有 2 个是并联型双缀饰产生的, 另外 10 个是级联型双缀饰产生. 并联双缀饰下, 两个场缀饰相同能级不同矩阵元, DDFWM 微扰链中密度矩阵元的下角标 2 先后分别被  $G_{3\pm}, G_{4\pm}$  代替; 而级联双缀饰下, 两个场缀饰相同能级相同矩阵元, DDFWM 微扰链中密度矩阵元的下角标 2 被  $G_{3\pm}, G_{4\pm}$  共同代替, 但  $G_{3\pm}, G_{4\pm}$  排列有前后之分, 以表现  $|2\rangle$  态变化过程的不同. 表 1 中的 DDF3E13 链和 DDF2E3 链分别代表并联和级

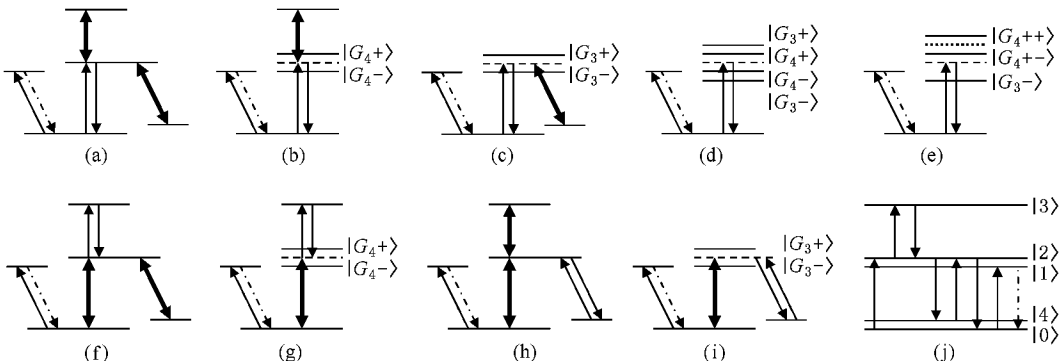


图 3 能级图 (a) 挡住的  $E'_3, E'_4$  场的能级图 (b) 和 (c) 挡住的  $E'_3, E'_4$  场的 DSWM 缀饰能级图 (d) 和 (e) 挡住的  $E'_2, E'_3$  场的 DDFWM 缀饰能级图 (f) 挡住的  $E'_2, E'_4$  场的能级图 (g) 挡住的  $E'_2, E'_4$  场的 DSWM 缀饰能级图 (h) 挡住的  $E'_2, E'_3$  场的能级图 (i) 挡住的  $E'_2, E'_3$  场 DSWM 缀饰能级图 (j) EWM 链  $E_3$  能级跃迁图

联情况下的两类微扰链.

本五能级中 $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 态构成了一个V形四能级系统(如图3(b)DSWM缀饰能级图),对应6个SWM微扰链,表1列举其中的S2,S3链.每条SWM链中的一个下角标2被 $G_{4\pm}$ 代替表示 $|2\rangle$ 受 $E_4$ 场的缀饰,产生14个DSWM信号,相位匹配条件为 $k_s^I$ (表1).类似地,态 $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$ 和 $|4\rangle$ 对应另一种四能级(如图3(c)DSWM缀饰能级图),也有6个SWM微扰链,表中选取S8,S11链.每条SWM链中的一个下角标2被 $G_{3\pm}$ 代替表示 $|2\rangle$ 受 $E_3$ 场的缀饰,有14个DSWM,相位匹配条件为 $k_s^{II}$ (表1).因此共有28个DSWM链.表中, $E_3$ 场缀饰情况我们用DS8E3链代表,而 $E_4$ 场缀饰用DS2E3链代表.

此外五能级中还有16个EWM信号产生,相位匹配条件为 $k_E^I$ (表1).我们选取EWM微扰链E3,其对应的能级跃迁过程如图3(j)所示.

在挡住 $E'_3, E'_4$ 场时,FWM,SWM和EWM信号的相位匹配条件为 $k_F = k_s^I = k_s^{II} = k_E^I$ ,均从沿光束3相反方向出射,即在这束光中DDDFWM,DSWM和EWM信号共存.

2)挡住的 $E'_2, E'_4$ 场,增强 $E_2, E_4$ 场

增强 $|0\rangle \rightarrow |2\rangle$ 之间的 $E_2$ 场和 $|2\rangle \rightarrow |4\rangle$ 的

$E_4$ 场,如图3(f)能级图,态 $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 构成V形四能级系统, $|2\rangle$ 受 $E_4$ 缀饰(图3(g)),产生DSWM信号的相位匹配条件为 $k_s^{III}$ (表1);EWM相位匹配条件为 $k_E^{II}$ (表1).可见此时DSWM和EWM出射方向 $k_s^{III} = k_E^{II}$ ,但此方向没有DDDFWM信号,所以我们不与研究.

3)挡住的 $E'_2, E'_3$ 场,增强 $E_2, E_3$ 场

增强 $|0\rangle$ 与 $|2\rangle$ 之间的 $E_2$ 场和 $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ 的 $E_3$ 场,能级图如图3(h)所示,态 $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$ 和 $|4\rangle$ 构成四能级系统, $|2\rangle$ 受 $E_3$ 缀饰(图3(h)),产生的DSWM信号的相位匹配条件为 $k_s^{IV}$ (表1);EWM相位匹配条件为 $k_E^{III}$ (表1).DSWM和EWM出射方向 $k_s^{IV} = k_E^{III}$ ,此方向也没有DDDFWM信号,同样不与研究这种情况.

由上可知,FWM微扰链有4条,SWM链12条,EWM链16条,DDDFWM链有12条,DSWM链有28条.

限于篇幅原因,在表1中列举了部分微扰链.FWM的四条链F1,F2,F3和F4.因为由不同态构成的两种能级系统产生DSWM,我们在两类SWM链中各选取两条,分别是S2和S3及S8和S11.EWM链是E3和E13.

表1 能级中的FWM,SWM,EWM微扰链及DDDFWM链和DSWM链

挡光方式	双缀饰四波混频 DDFWM	单缀饰六波混频 DSSWM	EWM
挡掉 $k'_3, k'_4$	$k_F = k_1 + k_2 - k'_2$	$k_s^I = k_1 + k_2 - k'_2 + k_3 - k_3$ $k_s^{II} = k_1 + k_2 - k'_2 + k_4 - k_4$	$k_E^I = k_1 + k_2 - k'_2 + k_3 - k_3 + k_4 - k_4$
挡掉 $k'_2, k'_4$		$k_s^{III} = k_1 + k_2 - k_2 + k_3 - k'_3$	$k_E^{II} = k_1 + k_2 - k_2 + k_3 - k'_3 + k_4 - k_4$
挡掉 $k'_2, k'_3$		$k_s^{IV} = k_1 + k_2 - k_2 + k_4 - k'_4$	$k_E^{III} = k_1 + k_2 - k_2 + k_3 - k_3 + k_4 - k'_4$
FWM	F1: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(1)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{12}^{(2)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{10}^{(3)}$ F2: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{20}^{(1)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{20}^{(2)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(3)}$ F3: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{02}^{(1)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{12}^{(2)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{10}^{(3)}$ F4: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{02}^{(1)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{20}^{(2)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(3)}$		
SWM	S2: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{20}^{(1)} \xrightarrow{\omega_3} \rho_{30}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_3} \rho_{20}^{(3)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{00}^{(4)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(5)}$ S3: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{02}^{(1)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{12}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_3} \rho_{13}^{(3)} \xrightarrow{\omega_3} \rho_{12}^{(4)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{10}^{(5)}$ S8: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{20}^{(1)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{20}^{(2)} \xrightarrow{\omega_4} \rho_{20}^{(3)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{00}^{(4)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(5)}$ S11: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{02}^{(1)} \xrightarrow{\omega_4} \rho_{04}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{02}^{(3)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{12}^{(4)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{10}^{(5)}$		
EWM	E3: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{20}^{(1)} \xrightarrow{\omega_3} \rho_{30}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_3} \rho_{20}^{(3)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{40}^{(4)} \xrightarrow{\omega_4} \rho_{20}^{(5)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{00}^{(6)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(7)}$ E13: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{02}^{(1)} \xrightarrow{\omega_4} \rho_{04}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{02}^{(3)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{12}^{(4)} \xrightarrow{-\omega_3} \rho_{13}^{(5)} \xrightarrow{\omega_3} \rho_{12}^{(6)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{10}^{(7)}$		
DDDFWM	DDF3E13: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{0(4\pm)}^{(1)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{1(3\pm)}^{(2)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{10}^{(3)}$ DDF2E3: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{(c_3 \pm c_4 \pm)}^{(1)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{00}^{(2)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(3)}$		
DSWM	DS2E3: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{20}^{(1)} \xrightarrow{\omega_3} \rho_{30}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_3} \rho_{(c_4 \pm 0)}^{(3)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{00}^{(4)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(5)}$ DS8E3: $\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{\omega_2} \rho_{(c_3 \pm 0)}^{(1)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{40}^{(2)} \xrightarrow{\omega_4} \rho_{20}^{(3)} \xrightarrow{-\omega_2} \rho_{00}^{(4)} \xrightarrow{\omega_1} \rho_{10}^{(5)}$		

DDFWM 中, 并联双缀饰下选 DDF3E13 链, 级联双缀饰下选 DDF2E3 链. 同样地在由不同缀饰形成的两类 DSWM 链中, 各选取一条, 分别是链 DS2E3 和 DS8E3.

为了量化地了解共存下的 EWM, DSWM 和 DDFWM. 下面研究挡住的  $E'_3, E'_4$  场,  $E_3$  和  $E_4$  为缀饰场时, 在与光束 3 相反方向的出射光中共存的 DDFWM, DSWM 和 EWM 的情况.

此时 DDFWM 包含级联、并联两种缀饰方式. 其中并联双缀饰微扰链的不同密度矩阵元相同能级, 共有两条微扰链. 级联双缀饰微扰链的相同密度矩阵元相同能级, 共有十条微扰链.

在三能级子系统中的 4 个 FWM 微扰链中, F2 与 F4 对应的 FWM 信号来自于一个小角度静态栅 ( $E_2$  光场和  $E'_2$  光场产生) 和大角度动态栅 ( $E_1$  光场和  $E'_2$  光场产生或  $E_1$  光场和  $E_2$  光场产生) 的贡献, F1 与 F3 对应的 FWM 信号来自于两个大角度动态栅 ( $E_1$  光场和  $E'_2$  光场产生或  $E_1$  光场和  $E_2$  光场产生) 的贡献. 因为从小角度静态光栅中衍射出的信号明显强于大角度动态光栅的, 所以 F2 与 F4 对应的 FWM 信号强度应该明显强于 F1 与 F3 对应的 FWM 信号强度, 对应的经历 F2 微扰链过程的 DDFWM 信号 (例如  $|\rho_{\text{DDF2E3}}|^2$ ) 占有主导地位, 而经历 F3 微扰链过程的 DDFWM 信号 (例如  $|\rho_{\text{DDF3E13}}|^2$ ) 处在从属地位.

首先推导级联 DDFWM 微扰链 DDF2E3 对应的极化率表达式  $\rho_{\text{DDF2E3}}$ . 该微扰链对应的 FWM 和 EWM 微扰链分别如表 1 中 F2 和 E3 所示. E3 链中包含有双缀饰子链  $\rho_{20}^{(1)} \xrightarrow{\omega_3} \rho_{30}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_3} \rho_{20}^{(3)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{40}^{(4)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{20}^{(5)}$ . 在子链中关于  $E_3$  场和  $E_4$  场的缀饰过程有顺序的连接在一起, 称其为级联双缀饰机制. 在非旋波近似下, 子链可以由以下三条密度矩阵方程表示:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{30} &= -d_7 \rho_{30} + iG_3 e^{ik_3 \cdot r} \rho_{20}, \\ \dot{\rho}_{40} &= -d_8 \rho_{40} + iG_4 e^{-ik_4 \cdot r} \rho_{20}, \\ \dot{\rho}_{20} &= -d_6 \rho_{20} + iG_2 e^{ik_2 \cdot r} \rho_{00} + iG_4 e^{ik_4 \cdot r} \rho_{40} \\ &\quad + iG_3 e^{-ik_3 \cdot r} \rho_{30}. \end{aligned}$$

然后利用 FWM 微扰链 F2, 在旋波近似条件下解方程得到稳态解

$$\rho_{\text{DDF2E3}} = \frac{G_a}{\Gamma_{00} d_1 d_6 \left( 1 + \frac{|G_3|^2}{d_6 d_7} + \frac{|G_4|^2}{d_6 d_8} \right)}, \quad (1)$$

式中  $G_a = -iG_1 G_2 G_2'^* e^{ik_F \cdot r}$ ,  $d_1 = \Gamma_{10} + i\Delta_1$ ,  $d_6 = \Gamma_{20} + i\Delta_2$ ,  $d_7 = \Gamma_{30} + i(\Delta_2 + \Delta_3)$ ,  $d_8 = \Gamma_{40} + i(\Delta_2 - \Delta_4)$ . 当实际电场为  $E_i = \epsilon_i e^{ik_i \cdot r}$  ( $E'_i = \epsilon'_i e^{ik_i \cdot r}$ ) 时, 利用另一个变量来描述电场:  $G_i = \frac{\epsilon_i \mu_i}{\hbar} \left( G'_i = \frac{\epsilon'_i \mu_i}{\hbar} \right)$ ,  $\Delta_i = \Omega_i - \omega_i$ . 其中  $\Delta_i$  是失谐量,  $\Gamma_{ij}$  是  $i$  能级和  $j$  能级间的弛豫系数,  $G_i$  是 Rabi 频率,  $\mu_i$  为对应的跃迁偶极矩.

可从 FWM 微扰链 F2 得到

$$\rho_{\text{F2}}^{(3)} = \frac{G_a}{\Gamma_{00} d_1 d_6},$$

从 SWM 链 S2 和 S8 分别解得

$$\rho_{\text{S2}}^{(5)} = \frac{-G_a |G_3|^2}{\Gamma_{00} d_1 d_6^2 d_7},$$

$$\rho_{\text{S8}}^{(5)} = \frac{-G_a |G_4|^2}{\Gamma_{00} d_1 d_6^2 d_8}.$$

在弱场近似下 ( $|G_3|^2 \ll \Gamma_{30} \Gamma_{20}$ ,  $|G_4|^2 \ll \Gamma_{40} \Gamma_{20}$ ), 表达式 (1) 可以展开为

$$\rho_{\text{DDF2E3}} \approx \rho_{\text{F2}}^{(3)} + \rho_{\text{S2}}^{(5)} + \rho_{\text{S8}}^{(5)}.$$

由此可知弱缀饰场条件下 DDFWM 信号是 FWM (F2), SWM (S2), SWM (S8) 信号相互叠加产生的.

接下来推导并联 DDFWM 微扰链 DDF3E13 对应的极化率表达式  $\rho_{\text{DDF3E13}}$ . 该微扰链对应的 FWM 和 EWM 微扰链 F3 和 E13 分别列于表 1. E13 链中包含有双缀饰子链  $\rho_{02}^{(1)} \xrightarrow{\omega_4} \rho_{04}^{(2)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{02}^{(3)}$  和  $\rho_{12}^{(4)} \xrightarrow{-\omega_3} \rho_{13}^{(5)} \xrightarrow{\omega_3} \rho_{12}^{(6)}$ . 因为这两条关于  $E_3$  场和  $E_4$  场缀饰的子链互不相连且并列于 EWM 微扰链中, 所以我们称其为并联双缀饰机制. 在非旋波近似下, 以上子链可以由以下四条密度矩阵方程表示:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{02} &= -d_2 \rho_{02} - iG_2'^* e^{-ik_2 \cdot r} \rho_{00} - iG_4'^* e^{-ik_4 \cdot r} \rho_{04}, \\ \dot{\rho}_{04} &= -d_5 \rho_{04} - iG_4 e^{ik_4 \cdot r} \rho_{02}, \\ \dot{\rho}_{12} &= -d_3 \rho_{12} + iG_1 e^{ik_1 \cdot r} \rho_{02} - iG_3 e^{ik_3 \cdot r} \rho_{13}, \\ \dot{\rho}_{13} &= -d_4 \rho_{13} - iG_3^* e^{-ik_3 \cdot r} \rho_{12}. \end{aligned}$$

然后利用 FWM 微扰链 F3, 在旋波近似条件下解方程得到稳态解

$$\rho_{\text{DDF3E13}} = \frac{G_a}{d_1 d_2 d_3 \left( 1 + \frac{|G_4|^2}{d_2 d_5} \right) \left( 1 + \frac{|G_3|^2}{d_3 d_4} \right)}, \quad (2)$$

式中

$$d_2 = \Gamma_{20} - i\Delta_2,$$

$$\begin{aligned}d_3 &= \Gamma_{12} + \chi(\Delta_1 - \Delta_2), \\d_4 &= \Gamma_{13} + \chi(\Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3), \\d_5 &= \Gamma_{40} + \chi(\Delta_4 - \Delta_2).\end{aligned}$$

表 1 中,由微扰链 F3 可以得到

$$\rho_{F3}^{(3)} = \frac{G_a}{d_1 d_2 d_3},$$

由 SWM 链 S3 和 S11 分别得到

$$\rho_{S3}^{(5)} = \frac{-G_a |G_4|^2}{d_1 d_2^2 d_5 d_3},$$

$$\rho_{S11}^{(5)} = \frac{-G_a |G_3|^2}{d_1 d_2 d_3^3 d_4},$$

通过 EWM 链 E13 求得

$$\rho_{E13}^{(7)} = \frac{G_a |G_3|^2 |G_4|^2}{d_1 d_2^2 d_3^3 d_4 d_5}.$$

在弱场条件下( $|G_3|^2 \ll \Gamma_{13}\Gamma_{12}$ ,  $|G_4|^2 \ll \Gamma_{20}\Gamma_{40}$ ), 表达式(2)可以如下展开:

$$\rho_{DDF3E13} \approx \rho_{F3}^{(3)} + \rho_{S3}^{(5)} + \rho_{S11}^{(5)} + \rho_{E13}^{(7)}.$$

由此可见 DDFWM 信号在弱缀饰场条件下可以看作由 FWM(F3), SWM(S3), SWM(S11), EWM(E13) 信号相互叠加产生.

我们可以较容易地得到 DSWM 的表达式,首先推导  $E_4$  场缀饰产生的 DSWM 信号极化率  $\rho_{DS2E3}$ . 该微扰链对应的 SWM 和 EWM 微扰链分别如表 1 中 S2 和 E3 所示. E3 链中包含有  $E_4$  场缀饰子链“ $\rho_{20}^{(3)} \xrightarrow{-\omega_4} \rho_{40}^{(4)} \xrightarrow{\omega_4} \rho_{20}^{(5)}$ ”.在非旋波近似下,子链可以由以下方程表示:

$$\dot{\rho}_{20} = -(\Gamma_{20} + i\Delta_2)\rho_{20} + iG_4 e^{ik_4 \cdot r} \rho_{40} + iG_3^* e^{-ik_3 \cdot r} \rho_{30}.$$

然后利用 SWM 微扰链 S2,在旋波近似条件下解方程得到稳态解

$$\rho_{DS2E3} = \frac{G_b}{\Gamma_{00} d_1 d_6 d_7 \left( d_6 + \frac{|G_4|^2}{d_8} \right)}, \quad (3)$$

其中  $G_b = iG_1 G_2 G_2^* G_3 G_3^* e^{ik_s^1 \cdot r}$ . 由表 1 中的微扰链 E3,可分别得到表达式

$$\rho_{E3}^{(7)} = \frac{G_b |G_3|^2 |G_4|^2}{\Gamma_{00} d_1 d_7 d_8 d_6^3}.$$

当  $|G_4|^2 \ll \Gamma_{20}\Gamma_{40}$  时,由(3)式可得

$$\rho_{DS2E3} \approx \rho_{S2}^{(5)} + \rho_{E3}^{(7)},$$

即 DSWM 信号在弱缀饰场条件下可以看作由 SWM(S2) 和 EWM(E3) 信号相互叠加产生.

同理,可以得到  $E_3$  场缀饰产生的 DSWM 信号极化率  $\rho_{DS8E3}$ .

$$\rho_{DS8E3} = \frac{G_c}{\Gamma_{00} d_1 d_6 d_8 \left( d_6 + \frac{|G_3|^2}{d_7} \right)}, \quad (4)$$

其中  $G_c = iG_1 G_2 G_2^* G_4 G_4^* e^{ik^1 \cdot r}$ .

DSWM 信号在弱缀饰场条件( $|G_3|^2 \ll \Gamma_{20}\Gamma_{30}$ ) 下,表达式(4)可以展开为  $\rho_{DS2E3} \approx \rho_{S8}^{(5)} + \rho_{E3}^{(7)}$ ,即看作 SWM(S8) 和 EWM(E3) 信号相互叠加产生的.

### 3. 并联和级联的 DDFWM 的 Autler-Townes(AT)分裂

先考虑并联双缀饰下的 DDFWM 的 AT 分裂现象.

当双缀饰场  $E_3$  和  $E_4$  分别变化时,由(1)得到的并联 DDFWM 信号强度的变化如图 4 所示.从图 4 可以看到,当  $G_4/\Gamma_{10} = 17.5$  不变,  $G_3/\Gamma_{10} = 10$ ,  $G_4/\Gamma_{10} = 17.5$  的曲线和  $G_3/\Gamma_{10} = 7.5$ ,  $G_4/\Gamma_{10} = 17.5$  的曲线 AT 分裂峰位置不变(均处于  $\pm 70$  处),这两对 AT 分裂峰受  $G_4$  控制;  $G_3/\Gamma_{10} = 10$  时对应控制实线中  $\pm 40$  处的一对 AT 分裂峰,  $G_3/\Gamma_{10} = 7.5$  对应点线中  $\pm 30$  处的一对 AT 分裂峰,可见,  $G_3$  控制这对 AT 峰,且间距随  $G_3$  值增大而变大,随  $G_3$  值减小间距变小.对表达式(2)求导化简后,可得到 AT 峰间距和  $G_3$  值关系的解析式为  $\Delta_{G_3-AT} = 2\{G_3[\Gamma_{13}^2 + 2\Gamma_{13}(\Gamma_{12} + \Gamma_{13}) - \Gamma_{13}^2]^{1/2} - \Gamma_{13}^2\}^{1/2}$ , 强场条件下  $G_3 \gg \Gamma_{12}, \Gamma_{13}$ , 上式近似为  $\Delta_{G_3-AT} \propto G_3$ . 同理,  $G_3/\Gamma_{10} = 10$  不变,实线和虚线中处于  $\pm 40$  处的两对峰位置也不变,这两对峰受  $G_3$  控制;  $G_4/\Gamma_{10} = 3.75$  时对应控制

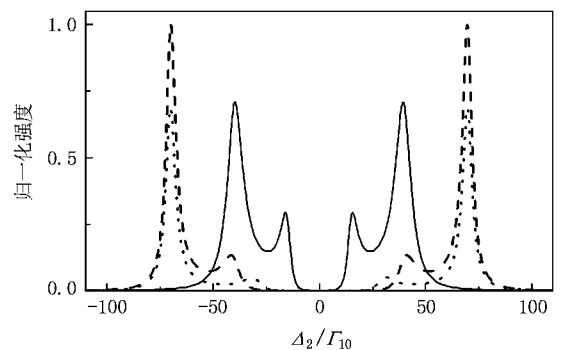


图 4 并联 DDFWM 强度 强度值以 DDFWM 信号的最大强度值归一化,  $\Gamma_{20}/\Gamma_{10} = 1.25$ ,  $\Gamma_{12}/\Gamma_{10} = 1.125$ ,  $\Gamma_{13}/\Gamma_{10} = 0.875$ ,  $\Gamma_{40}/\Gamma_{10} = 0.125$ ,  $\Delta_1/\Gamma_{10} = \Delta_3/\Gamma_{10} = \Delta_4/\Gamma_{10} = 0$ . 实线表示  $G_3/\Gamma_{10} = 10$ ,  $G_4/\Gamma_{10} = 3.75$  短划虚线表示  $G_3/\Gamma_{10} = 10$ ,  $G_4/\Gamma_{10} = 17.5$  点线表示  $G_3/\Gamma_{10} = 7.5$ ,  $G_4/\Gamma_{10} = 17.5$ .

实线中  $\pm 15$  处的一对 AT 分裂峰,  $G_4/\Gamma_{10} = 17.5$  对应虚线中  $\pm 70$  处的一对 AT 分裂峰, 可见  $G_4$  控制的 AT 分裂峰间距, 随着  $G_4$  值增大而变大,  $G_4$  值减小而变小, 表示 AT 峰间距和  $G_4$  值关系的解析式为  $\Delta_{G_4-AT} = 2\{G_4[G_4^2 + 2\Gamma_{40}(\Gamma_{20} + \Gamma_{40})]^{1/2} - \Gamma_{40}^2\}^{1/2}$ , 强场条件下  $G_4 \gg \Gamma_{20}, \Gamma_{40}$ , 上式近似为  $\Delta_{G_4-AT} (\Delta_{G_4-AT}) \propto G_3(G_4)$ .

图 5 中的级联 DDFWM 信号强度曲线是根据表达式 (1) 作图得到.  $\Delta_3 = 0, \Delta_4/\Gamma_{10} = 500$  时,  $G_4$  不起作用,  $G_3$  作用产生一对 AT 分裂峰(实线), 此时相当于单缀饰作用下发生 AT 分裂. 我们可以令表达式 (1) 中的  $G_4 = 0$ , 再对此式求导并近似, 可得到 AT 峰间距和  $G_3$  值关系的解析式为:  $\Delta_{G_3-AT} = 2\{G_3[(G_3^2 + 2\Gamma_{30}(\Gamma_{20} + \Gamma_{30}))^{1/2} - \Gamma_{30}^2]^{1/2}\}$ . 强场条件下  $G_3 \gg \Gamma_{20}, \Gamma_{30}$ , 上式近似为  $\Delta_{G_3-AT} \propto G_3$ . 当  $G_3 < G_4, G_3/\Gamma_{10} = 2.5, \Delta_4/\Gamma_{10} = 2.5$  时,  $G_3$  一次缀饰作用产生一对 AT 分裂峰,  $G_4$  作用于正半轴的峰, 使之二次分裂为一对 AT 峰(虚线); 而当  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -2.5$  时,  $G_4$  改变负半轴的峰, 使之二次分裂为一对 AT 峰(点线). 同理, 当  $G_3 < G_4$  时, 调整  $\Delta_3$  取值, 我们可以使  $G_4$  起到一次缀饰作用,  $G_3$  起到二次缀饰作用.

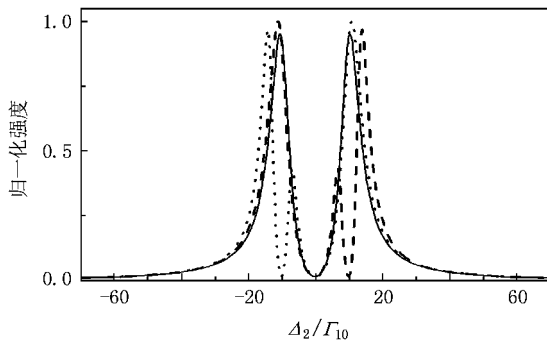


图 5 级联 DDFWM 强度 以 DDFWM 信号最大强度值归一化,  $\Gamma_{20}/\Gamma_{10} = 1.25, \Gamma_{30}/\Gamma_{10} = 0.5, \Gamma_{40}/\Gamma_{10} = 0.125, \Delta_1/\Gamma_{10} = \Delta_3/\Gamma_{10} = 0, G_3/\Gamma_{10} = 2.5, G_4/\Gamma_{10} = 1.25$ . 实线表示  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 500$ , 短划线表示  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 2.5$ , 点线表示  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -2.5$ .

图 5 可以由图 1(g) 级联 DDFWM 缀饰能级图解释. 当  $E_3$  场作用于  $|2\rangle$  使其分裂为  $|G_3 +\rangle$  和  $|G_3 -\rangle$  两能级, 加入  $E_4$  场后, 当  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -2.5$  时, 将  $|G_3 +\rangle$  分裂为  $|G_4 ++\rangle$  和  $|G_4 +-\rangle$ . 类似地, 当  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 2.5$  时,  $E_4$  场将  $|G_3 -\rangle$  分裂为

$|G_4 -+\rangle$  和  $|G_4 --\rangle$ , 图 1(g) 中没有画出.

由图 3 可以看出, 两个缀饰场为并联结构且缀饰相同能级时, 对能级的 AT 分裂效应的影响是并列的, 图中每条强度曲线中有两对 AT 分裂峰, 对应图 3(d)  $|2\rangle$  受  $E_3$  和  $E_4$  场缀饰后分裂产生的四个能级, 负半轴的峰对应的是分裂得到的  $|G_3 +\rangle$  和  $|G_4 +\rangle$  能级, 正半轴的峰对应的是  $|G_3 -\rangle$  和  $|G_4 -\rangle$  能级. Rabi 频率  $G_3$  控制  $|G_3 +\rangle$  和  $|G_3 -\rangle$  造成的 AT 峰的间距, 而  $G_4$  控制  $|G_4 +\rangle$  和  $|G_4 -\rangle$  造成的 AT 峰的间距.

由以上分析可知, 双缀饰场下会发生原子的能级分裂, 形成 AT 分裂现象, 且由于双缀饰方式的差异, 原子的能级分裂形式也不同, 产生 DDFWM 信号强度的不同变化. 并联时共有四个 AT 峰, 且两个缀饰场相互独立, 每个缀饰场也只影响其中一对 AT 峰, 对另一对 AT 峰没有作用. 而在级联系统中, 两个缀饰场相互间并不独立, 存在一次缀饰和二次缀饰.

#### 4. DDFWM, DSWM 和 EWM 的抑制增强及共存和竞争

在如图 1 所示的五能级系统中, EWM 和被缀饰场缀饰的 FWM、SWM 同时产生于光束 4 中(图 2), 它们来自于相同的原子相干, 产生的能量此消彼长. EWM 相对于其他两种信号属于最高阶非线性光学过程, 信号强度相对来说很弱, 为了观测, 必须在增强该信号的同时抑制住另外两种信号. 在我们所提供的五能级中, 在挡住  $E'_3, E'_4$  场并增强  $E_3, E_4$  场的情况下似乎可以满足这一要求. 简单来看, 从 EWM 的表达式  $\rho_{E3}^{(7)} = \frac{G_b |G_3|^2 |G_4|^2}{\Gamma_{00} d_1 d_7 d_8 d_6^3}$  和  $\rho_{E13}^{(7)} = \frac{G_a |G_3|^2 |G_4|^2}{d_1 d_2^2 d_3^2 d_4 d_5}$  可以看到, EWM 的信号强度正比于  $G_1 G_2 (G'_2)^* |G_3|^2 |G_4|^2$ , 那么增大这几个参变量会使 EWM 强度增大, 然而值得注意的是在 DDFWM 的表达式 (1) 和 (2) 和 DSWM 的表达式 (3) 和 (4) 中, 信号强度都分别反比于各自缀饰场的 Rabi 频率, 也就是说可以通过控制 DDFWM 和 DSWM 的缀饰场来抑制其强度. 下面就通过作图模拟来详细分析缀饰场对 DDFWM 和 DSWM 的抑制和增强作用.

首先考虑共存信号中的 DDFWM 信号. 由于级

联 DDFWM 信号相对于并联 DDFWM 起主要作用,因此先着重分析级联 DDFWM. 图 6 和图 7 中,级联 DDFWM 信号强度以不加缀饰场时的 FWM 强度归一化作图,纵坐标强度值在 1 以上表示信号被增强,1 以下则为被抑制.图 6 是级联 DDFWM 信号扫描缀饰场失谐量  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  和  $\Delta_4/\Gamma_{10}$  的三维强度图,图 7 是级联 DDFWM 信号扫描缀饰场失谐量  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  的强度图,也就是说图 7 相当于是图 6 的横向切面图.

在图 6(a) 中  $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$ , 信号强度值都在 1 以

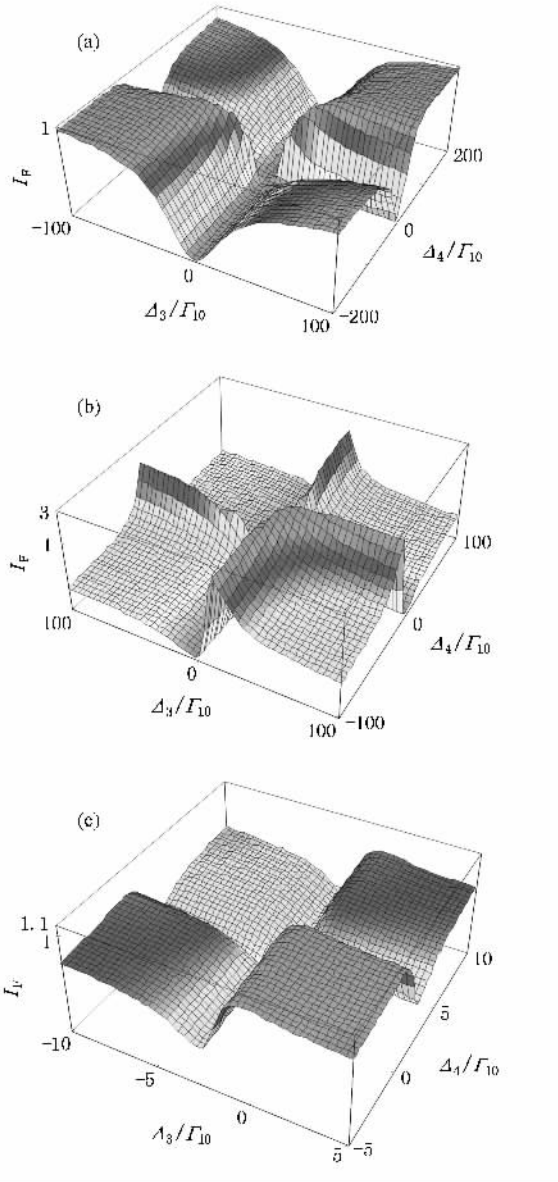


图 6 级联 DDFWM 信号扫描缀饰场失谐量  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  和  $\Delta_4/\Gamma_{10}$  的三维强度图. 以  $G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 0$  时的强度值归一化, 参数为  $G_1/\Gamma_{10} = G_2/\Gamma_{10} = 1, \Gamma_{12}/\Gamma_{10} = \Gamma_{13}/\Gamma_{10} = \Gamma_{20}/\Gamma_{10} = \Gamma_{40}/\Gamma_{10} = 1, \Delta_1 = 0$ . (a)  $G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 5, \Delta_2 = 0$ ; (b)  $G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 5, \Delta_2/\Gamma_{10} = 2$ ; (c)  $G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 0.5, \Delta_2/\Gamma_{10} = 2$ .

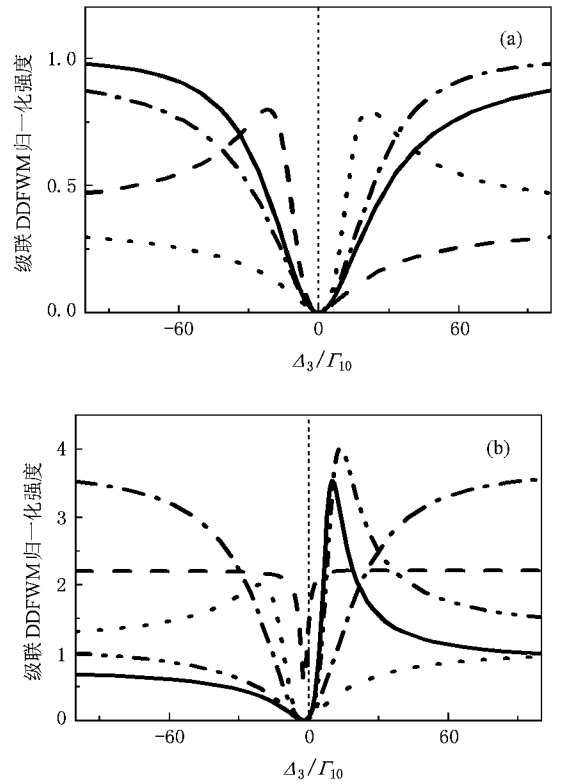


图 7 级联 DDFWM 信号扫描缀饰场失谐量  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  的强度图. 以  $G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 0$  的强度值归一化, 参数为  $\Gamma_{12}/\Gamma_{10} = \Gamma_{13}/\Gamma_{10} = \Gamma_{20}/\Gamma_{10} = \Gamma_{40}/\Gamma_{10} = 1, G_1/\Gamma_{10} = G_2/\Gamma_{10} = 1, G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 5, \Delta_1 = 0$ . (a)  $\Delta_2 = 0, \Delta_4/\Gamma_{10} = -200$  (实线),  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -20$  (虚线), 信号强度扩大 300 倍;  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 20$  (点线);  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 200$  (点虚线). (b)  $\Delta_2/\Gamma_{10} = 2, \Delta_4/\Gamma_{10} = 100$  (实线),  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 2$  (虚线),  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -2$  (点线),  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -10$  (点虚线),  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -100$  (点虚线).

下,说明 FWM 单纯地被  $E_3$  场和  $E_4$  场同时抑制,而且在  $\Delta_3 = 0$  和  $\Delta_4 = 0$  的位置抑制作用最大.这是因为两个强场同时缀饰于  $|2\rangle$  能级,把  $|2\rangle$  能级分裂为两个分离于原能级位置的  $|+\rangle, |-\rangle$  能级,相对于  $\Delta_3 \neq 0, \Delta_4 \neq 0$ ,当  $\Delta_3 = 0, \Delta_4 = 0$  时,两个缀饰场的分裂作用最大,这样原来 FWM 共振增强的条件被破坏了,信号被严重抑制了.仔细观察图 6(a) 还发现不论扫描  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  还是扫描  $\Delta_4/\Gamma_{10}$ ,抑制作用并不是关于  $\Delta_3 = 0$  或  $\Delta_4 = 0$  严格对称的,图 7(a) 中更明显的体现了这一点.当  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -200$  (实线) 时,  $\Delta_3 < 0$  部分的信号相对于  $\Delta_3 > 0$  时要小,说明此时缀饰场的抑制作用更大;当  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -20$  (虚线) 时,信号强度在大部分区域相对于  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -200$  (实线) 时的更小,这说明缀饰场趋于共振时,缀饰作用更大,然而值得一提的是在  $\Delta_3 < 0$  部分的信号出现

了极大值点,这说明在这一点级联双缀饰场的抑制作用反而减小了,即出现了抑制极小值点.首先从数学上说明其原因:从表达式(1)可以得到在弱场近似下( $|G_3|^2 \gg \Gamma_{30}\Gamma_{20}$ ,  $|G_4|^2 \gg \Gamma_{40}\Gamma_{20}$ )级联 DDFWM 信号强度反比于  $\Gamma_{20}^2 + \frac{(\Gamma_{40}^2 |G_3|^2 + \Gamma_{30}^2 |G_4|^2) + (|G_3|^2 \Delta_4 - |G_4|^2 \Delta_3)^2}{(\Gamma_{40}^2 + \Delta_4^2)(\Gamma_{30}^2 + \Delta_3^2)}$ .

从该式中可以知道在图 7(a)的虚线中的抑制极小值点满足条件  $|G_3|^2 \Delta_4 = |G_4|^2 \Delta_3$ ,说明缀饰场抑制作用的减小是因为这两个场的抑制作用相互抵消,而抑制极小值点正好对应抵消作用的最大部分.从中可以了解到在级联双缀饰机制中,两个场对 FWM 的抑制作用有相互抵消的成分,而不是简单地相互叠加.

在图 6(b)中,当  $\Delta_2 = 2$  时,级联 DDFWM 信号强度在 1 以上和以下都有分布,说明此时双缀饰场对 FWM 既有抑制又有增强作用,这一点在扫描  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  和  $\Delta_4/\Gamma_{10}$  时都能反映出来.也正因为这样,图 6(b)显得比较复杂,而图 7(b)作为图 6(b)的横向切面图可以很清楚的反应出信号强度的复杂变化.在图 7(b)中,虽然实线( $\Delta_4/\Gamma_{10} = 100$ )和点点虚线( $\Delta_4/\Gamma_{10} = -100$ )的作图参数  $\Delta_4$  的取值相差很大,但是图形基本相同,从小到大扫描  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  时,都是先出现抑制峰后出现增强峰,而信号强度相差不大,其中抑制峰都出现在  $\Delta_3/\Gamma_{10} = -2$  的位置,而点点虚线的增强峰的位置相对于实线的增强峰的位置右移.相反的是虚线( $\Delta_4/\Gamma_{10} = 2$ ),点线( $\Delta_4/\Gamma_{10} = -5$ )和点虚线( $\Delta_4/\Gamma_{10} = -10.5$ )的作图参数  $\Delta_4$  的取值相差不大,但是图形或信号强度相差很大.虚线反映的信号强度扩大了 300 倍,那么原始强度应该远小于 1,而且虚线中只有在  $\Delta_3/\Gamma_{10} = -2$  的位置出现一个抑制峰.点虚线中同样只在  $\Delta_3/\Gamma_{10} = -2$  的位置出现一个抑制峰,强度远小于 1,但是在  $|\Delta_3/\Gamma_{10}|$  取值比较大的时候信号的背底强度却是大于 1 的.点线反映的是一个类似于实线和点虚线的图形,既有抑制峰又有增强峰,但是先出现增强峰后出现抑制峰.之所以会出现以上五条线的图形是因为:当  $|\Delta_4/\Gamma_{10}|$  很大时,缀饰场  $E_4$  对 FWM 的作用越来越小,扫描  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  时只反映了缀饰场  $E_3$  对 FWM 的作用,如实线和点点虚线所示.其中抑制峰满足的条件是  $\Delta_2 + \Delta_3 = 0$ ,即  $\Delta_3/\Gamma_{10} = -\Delta_2/\Gamma_{10} = -2$ ,此时  $|2, 13$  能级与  $E_2, E_3$  共振,缀饰场  $E_3$

对 FWM 的抑制作用最大.增强峰满足的条件是  $\omega_2 + \frac{1}{2}\Delta_{AT} + \omega_3 = \Omega_2 + \Omega_3$ ,即  $\Delta_3/\Gamma_{10} = -\Delta_2/\Gamma_{10} + \frac{1}{2}\Delta_{AT}/\Gamma_{10}$ .此时  $|2$  被  $E_3$  缀饰后分裂的负能级  $|G_3 -$  参与了四波混频信号共振,缀饰场  $E_3$  使原先失谐的四波混频信号重新共振,对 FWM 的增强作用最大.当  $|\Delta_4/\Gamma_{10}|$  的取值在 2 附近时,缀饰场  $E_4$  对缀饰场  $E_3$  的影响不可忽视,两者的相互作用非常强烈和复杂,以至于  $|\Delta_4/\Gamma_{10}|$  的微小变化都会使信号强度发生巨大变化,如虚线  $\times$  点线和点虚线所示.不过可以肯定的是这三条线的抑制峰都满足缀饰场  $E_3$  抑制作用最大的条件  $\Delta_2 + \Delta_3 = 0$ ,而且在虚线中,背底强度远小于 1 是由于  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 2$  时缀饰场  $E_4$  满足了对 FWM 抑制最大的条件  $\Delta_2 - \Delta_4 = 0$  造成的,而在点虚线中背底强度大于 1 是由于  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -10.5$  时缀饰场  $E_4$  对 FWM 起增强作用造成的.级联 DDFWM 信号扫描缀饰场失谐量  $\Delta_4/\Gamma_{10}$  的强度图反映的物理含义与图 5 相同,只是图形相反,在此不作复述.

级联双缀饰弱场情况下,两场相互影响较小,所以产生的信号图如图 6(c)所示.由于缀饰场为弱场,其抑制增强作用也比较弱,所以信号强度在 1 附近.另外在  $\Delta_3 > 0, \Delta_4 < 0$  区域的信号强度明显大于其他区域,而在  $\Delta_3 < 0, \Delta_4 > 0$  区域的信号强度明显小于其他区域,可见在弱场条件下,两个缀饰场的抑制增强作用是叠加关系.

并联 DDFWM 信号弱于级联 DDFWM,而且其双缀饰场的抑制增强机制也相对简单.在弱缀饰场条件下并联 DDFWM 展开式(2)说明并联 DDFWM 信号是由一个 FWM,两个 SWM 和一个 EWM 叠加构成,而级联 DDFWM 展开式(1)说明级联 DDFWM 信号是由一个 FWM,两个 SWM 叠加而成.在弱缀饰场条件下 EWM 信号微弱到可以忽略,这样级联和并联的 DDFWM 都是由相同能级系统产生的 FWM 和 SWM 构成,所以并联 DDFWM 在弱场条件下抑制增强图与级联的图 6(c)相似.下面仅对强场的抑制增强作分析.

图 8 是并联双缀饰 DDFWM(表达式(2))的强度图,并以  $G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 0$  时的强度值归一化.从图 8(a)中可以看出并联双缀饰的纯抑制强度图是关于  $\Delta_3/\Gamma_{10} = 0$  和  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 0$  对称的,这是和级联的图 6(a)有差别的.图 8(c)是图 8(a)的切面

图 8 从实线到点线, 它们都在  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 0$  的位置有抑制峰, 这是缀饰场  $E_4$  造成的. 随着  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  的减小, 这三条线的背底强度逐渐变小, 这是缀饰场  $E_3$  对 FWM 的抑制作用逐渐增大造成的. 图 8(b) 体现了在  $\Delta_2/\Gamma_{10} = 2$  时缀饰场  $E_3$  和  $E_4$  对 FWM 的抑制增强作用. 图中在  $\Delta_3/\Gamma_{10} = 10$  和  $\Delta_4/\Gamma_{10} = -10$  的位置增强作用特别明显, 这是缀饰场  $E_3$  和  $E_4$  对 FWM 的增强作用叠加的结果, 这种现象在级联

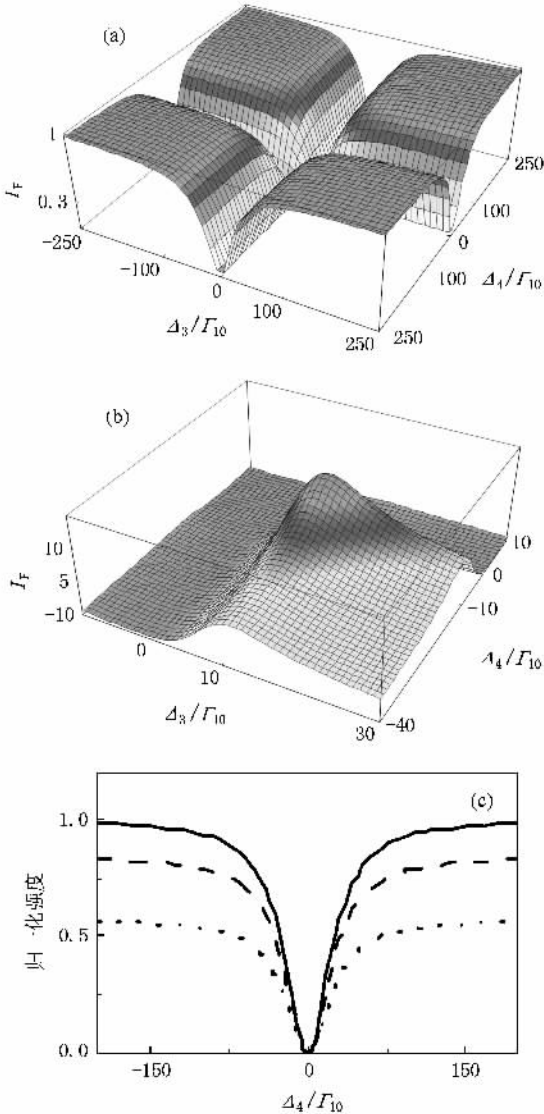


图 8 并联双缀饰 DDFWM 的强度图 以  $G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 0$  时的强度值归一化, 其中  $\Gamma_{12}/\Gamma_{10} = \Gamma_{13}/\Gamma_{10} = \Gamma_{20}/\Gamma_{10} = \Gamma_{40}/\Gamma_{10} = 1, G_1/\Gamma_{10} = G_2/\Gamma_{10} = 1, G_3/\Gamma_{10} = G_4/\Gamma_{10} = 5, \Delta_1 = 0$  (a)  $\Delta_2 = 0$ , 扫描缀饰场失谐量  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  和  $\Delta_4/\Gamma_{10}$  (b)  $\Delta_2/\Gamma_{10} = 2$ , 扫描缀饰场失谐量  $\Delta_3/\Gamma_{10}$  和  $\Delta_4/\Gamma_{10}$  (c)  $\Delta_2 = 0$ , 扫描缀饰场失谐量  $\Delta_4/\Gamma_{10}$ ,  $\Delta_3/\Gamma_{10} = 250$ (实线);  $\Delta_3/\Gamma_{10} = 60$ (虚线);  $\Delta_3/\Gamma_{10} = 30$ (点线).

DDFWM 的图 8(b) 中不曾出现, 可见并联 DDFWM 中两个缀饰场之间的相互影响比较小.

图 9 是 DSWM 表达式(3)对  $\Delta_4/\Gamma_{10}$  作图, 并以  $G_4/\Gamma_{10} = 0$  时的 DSWM 强度归一化. 图中反映了缀饰场  $E_4$  对 SWM 的抑制增强作用. 当  $\Delta_2/\Gamma_{10} = 0$  时, 信号强度如实线所示都小于 1, 缀饰场  $E_4$  对 SWM 只有抑制作用且抑制极大值出现在  $\Delta_4/\Gamma_{10} = 0$  位置. 随着  $\Delta_2/\Gamma_{10}$  的增大, 信号强度如虚线、点线、点虚线所示分布在 1 的上下, 这说明缀饰场  $E_4$  对 SWM 有抑制增强作用且抑制峰的位置在  $\Delta_4/\Gamma_{10} = \Delta_2/\Gamma_{10}$  的位置, 抑制峰和增强峰的位置随  $\Delta_2/\Gamma_{10}$  的增大而向右移动. 单缀饰场对 SWM 的抑制增强作用类似于单缀饰场对 FWM 过程的作用, 即抽运场频率若与原能级耦合, 因缀饰场引起原能级分裂, 混频信号被抑制, 而当抽运场与缀饰产生的分裂能级共振时, 混频信号被增强.

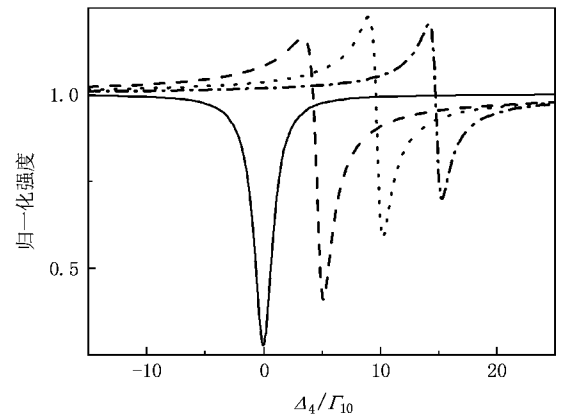


图 9 DSWM 强度 以  $G_4/\Gamma_{10} = 0$  时的 DSWM 强度归一化, 其他参数为  $\Gamma_{20}/\Gamma_{10} = 1.25, \Gamma_{40}/\Gamma_{10} = 0.125, \Gamma_{00}/\Gamma_{10} = 0.125, \Gamma_{30}/\Gamma_{10} = 0.5, \Delta_1/\Gamma_{10} = \Delta_3/\Gamma_{10} = 0, G_4/\Gamma_{10} = 0.375, \Delta_2/\Gamma_{10} = \alpha$  (实线)  $\Delta_2/\Gamma_{10} = 1.25$  (虚线)  $\Delta_2/\Gamma_{10} = 2.5$  (点线)  $\Delta_2/\Gamma_{10} = 3.75$  (点虚线)

在分析清楚了缀饰场对 DDFWM 和 DSWM 的抑制增强作用之后, 就可以利用 DDFWM、DSWM 和 EWM 的共存和竞争关系, 通过调节和控制缀饰场, 达到例如抑制五能级中的 FWM 和 SWM 来观测到 EWM 信号的目的. 同样道理, 在可以在 DSWM 和 EWM 共存的环境中抑制 SWM 来观测 EWM 信号.

### 5. 总 结

本文从理论上分析了五能级原子系统中双缀饰

四波混频、单缀饰六波混频以及八波混频的共存和竞争.

在本五能级中,通过挡住某些抽运光,可使 DDFWM、DSWM 及 EWM 信号光满足相同相位匹配条件,沿同一方向传播.这一束光中的多波混频信号是由共同能级的原子相干产生的,所以相互间会出现竞争效应.在并联双缀饰四波混频中,两个缀饰场之间的相互作用是很弱或是几乎没有的;而级联双缀饰两个缀饰场之间的联系明显比并联要大.

此外分析了缀饰场对 DDFWM 和 DSWM 的抑制或增强作用.其中 DDFWM 包含有级联、并联两种缀饰方式.弱场条件下,DDFWM 信号可以看作 FWM,

SWM 和 EWM 共同的量子干涉作用.强场条件下,并联 DDFWM 的两个缀饰场分别造成信号强度曲线中的一对 AT 分裂峰,而级联 DDFWM 的两个缀饰场分别能级进行一次缀饰和二次缀饰,在信号强度曲线中可见三个 AT 峰.级联形式的两个缀饰场相互作用比较复杂,它们对 DDFWM 信号的抑制增强作用相互影响,有抵消也有叠加;而并联形式的两个缀饰场间相互作用并不强烈,对信号的抑制增强作用只是简单的叠加.单缀饰场对 SWM 的影响与单缀饰场对 FWM 作用的原理相似.缀饰场对 DDFWM 和 DSWM 的抑制或增强作用理论为抑制 FWM 和 SWM 的强度,加强 EWM 信号提供了依据.

- 
- [ 1 ] Harris S E 1997 *Phys. Today*. **50** ( 7 ) 36
- [ 2 ] Wu Y 2005 *Phys. Rev. A* **71** 053820
- [ 3 ] Wang H, Goorskey D, Xiao M 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 073601
- [ 4 ] Lukin M D, Yelin S F, Fleischhauer M, Scully M O 1999 *Phys. Rev. A* **60** 3225
- [ 5 ] Yan M, Rickey E G, Zhu Y F 2001 *Phys. Rev. A* **64** 013412
- [ 6 ] Zhang Y P, Brown A W, Xiao M 2007 *Opt. Lett.* **32** 1120
- [ 7 ] Zhang Y P, Brown A W, Xiao M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 123603
- [ 8 ] Zhang Y P, Xiao M 2007 *Opt. Express* **15** 7182
- [ 9 ] Sun J, Zuo Z C, Mi X, Yu Z H, Wu L A, Fu P M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 149 ( in Chinese ) [ 孙江、左战春、米辛、俞祖和、吴令安、傅盘铭 2005 物理学报 **54** 149 ]

# Co-existence of multi-wave mixing in an opening five-level atomic system<sup>\*</sup>

Shen Lei-Jian<sup>1)</sup> Du Yi-Gang<sup>1)</sup> Li Chuang-She<sup>1)</sup> Zhang Yan-Peng<sup>1)†</sup> Nie Zhi-Qiang<sup>1)</sup>  
Zuo Cui-Cui<sup>1)</sup> Gan Chen-Li<sup>1)</sup> Zheng Huai-Bin<sup>1)</sup> Lu Ke-Qing<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

<sup>2)</sup> *Department of Physics, University of Arkansas, Fayetteville 72701, USA*

<sup>3)</sup> *State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China*

( Received 28 November 2008 ; revised manuscript received 13 August 2008 )

## Abstract

We study the co-existence of multi-wave mixing processes in an open five-level atomic system affected by strong coupling fields. Competition among four-wave mixing ( FWM ) with two dressing fields, the six-wave mixing ( SWM ) with one dressing field as well as the eight-wave mixing ( EWM ) propagating along the same direction can be evoked by adjusting laser beams because these multi-wave mixing signals are induced by atomic coherence between common levels. With the dressing fields properly controlled, the FWM and SWM signals can be suppressed while the EWM signals enhanced in the beam. We also amply analyze the difference between the parallel-cascade and sequential-cascade doubly dressing mechanisms in doubly-dressed four-wave mixing ( DDFWM ) processes.

**Keywords :** doubly-dressed four-wave mixing, dressed six-wave mixing, eight-wave mixing suppression and enhancement

**PACC :** 4250, 3280, 4265

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60308002, 60678005 ), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China ( Grant No. 200339 ), the Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education, China ( Grant No. 105156 ), the Program for New Century Excellent Talents in University ( Grant No.08-0431 ), the Fok Ying-Tung Education Foundation for Young Teachers in the Institutions of Higher Education of China ( Grant No. 101061 ) and the Doctoral Program Foundation of Institutions of Higher Education of China ( Grant No. 20050698017 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: ypzhang@mail.xjtu.edu.cn