

文章编号: 0253-2239(2010)11-3336-06

# 级联四能级光学量子相干系统子类型的结构多样性

刘晓东<sup>1, 2</sup> 孟冬冬<sup>1</sup> 张森林<sup>1</sup> 闫学群<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津工业大学理学院物理系, 天津 300160; <sup>2</sup> 日本佐贺大学理工学部, 佐贺 840-8502 日本)

**摘要** 级联型四能级系统由于具有 6 个可能的光学跃迁通道, 因而有许多现实的子类型可供光学量子相干效应的理论和实验探讨。利用布尔代数方法, 按照可能存在的跃迁通道, 结合电偶极跃迁选择定则, 研究了级联四能级系统的所有的通道子类型, 得到了 17 个三通道和 2 个四通道的现实通道子类型。然后, 仅仅按照涉及的光场的强弱来区分, 又得到了 168 种现实强度子类型。这种子类型的结构多样性为量子光学、量子信息科学和精密光谱学等理论及应用研究提供了更灵活的能级选择。

**关键词** 相干光学; 量子相干; 结构多样性; 级联系统; 布尔代数; 跃迁通道

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030110.3336

## Multiformity of Subtypes of Cascade-Type Four-Level Optical Quantum Coherence Systems

Liu Xiaodong<sup>1, 2</sup> Meng Dongdong<sup>1</sup> Zhang Senlin<sup>1</sup> Yan Xuequn<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160 China)  
(<sup>2</sup> Faculty of Science and Engineering, Saga University, Saga 840-8502 Japan)

**Abstract** The cascade four-level system has six possible optical transition channels and provides many real subtypes for theoretical and experimental studies about quantum coherence effects. Using Boolean algebra method, according to possible existing transition channels, combining electric dipole selection rule, all channel subtypes of cascade four-level scheme are studied, the realistic channel subtypes of 17 three transition channels and 2 four transition channels are got. Furthermore, 168 real intensity subtypes appear when one distinguishes each of related laser field intensities only. This multiformality of realistic channel and intensity subtypes provides more subtle energy level scheme-choosing chances for quantum optics, quantum information science, precise laser spectroscopy, etc.

**Key words** coherence optics; quantum coherence; multiformality; cascade system; Boolean algebra; transition channel

### 1 引 言

为了研究众多的光学量子相干现象, 人们必须考虑相关组分原子或分子所拥有的能级结构。三能级结构是最简单而基础的, 按照能级间距或等价地按照光学跃迁通道和外加光场的情况仅可以分为  $\Lambda$ 、V 和级联/梯型 3 种, 人们已经用它解释并预言了大量的光学量子相干现象, 在实现了具有重要意义电磁诱导透明、无反转激光、超慢光速、光量子信息存储以及超精细光谱测量等科学实验<sup>[1~3]</sup> 之后

新成果依然层出不穷。相对于三能级结构四能级结构就显得稍加复杂, 由于其额外选用的能级可以处于灵活的位置, 使其产生了各具特色的 7 种子类型, 它们是 N 型<sup>[4, 5]</sup>、三脚架和倒三脚架型<sup>[6, 7]</sup>、Y 和倒 Y 型<sup>[8, 9]</sup>、金刚石型和级联/梯型<sup>[10, 11]</sup>, 使系统具有了更多的, 三能级系统无法企及的新特性。到目前为止, 半数以上的四能级光学量子相干理论和实验研究涉及 N 型系统, 而 Y、倒 Y、倒三脚架和级联型相对研究较少。在具体的理论和实验研究中, 一旦

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-04-14

基金项目: 天津市教委高等学校教师科研项目(20070505)和天津工业大学博士科研启动项目(20080033, 20080057)资助课题。

作者简介: 刘晓东(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事量子光学、非线性光学和红外光谱学等方面的研究。

E-mail: liuxiaodong@tjpu.edu.cn

选定了其中的某种类型,就要进一步确定符合现实情况的子类型。通过一系列的研究,发现就级联型四能级系统来说,表面上看只有 3 个跃迁通道,实际上具有 6 个可能的光学跃迁通道,因而就有许多现实的子类型可供理论和实验探讨,比其它 6 种四能级系统都复杂<sup>[12~30]</sup>。本文使用了布尔代数方法,系统地分析了级联型四能级结构所具有的子类型结构,以期推动该类型系统得到充分的研究和利用。

### 2 级联四能级系统的定义

在级联四能级系统图中,把四个能级从低到高分别标记为  $|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle$  和  $|4\rangle$ , 设相应的能量为  $\hbar\omega_i (i = 1, 2, 3, 4), 0 = \hbar\omega_1 < \hbar\omega_2 < \hbar\omega_3 < \hbar\omega_4$ , 相邻 2 个能级的能级差为  $E_3 = \hbar\omega_{43}, E_2 = \hbar\omega_{32}$  和  $E_1 = \hbar\omega_{21}$ 。按照人们公认的定义,对于级联四能级光学量子相干系统,这 3 个能级间可能的电磁辐射频率大小处于同一个量级,位于从紫外到中红外的光频区,而全部可能的跃迁通道共有 6 个,标记为 A~F,如图 1 所示。

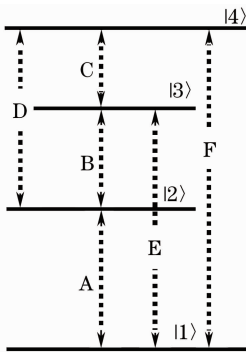


图 1 级联四能级系统及可能跃迁通道的定义  
Fig. 1 Definition of the cascade-type four-level system and possible transition channels

### 3 级联四能级系统的现实通道子类型

在级联四能级系统中,对于 6 个可能的跃迁通道,如果约定对某一个通道只有独立地施加(或产生)了光场和没有相关光场两种情况,那么我们就采用布尔代数的多变量二值逻辑的不同状态组合方法,来系统地研究可能出现的通道子类型中哪些是现实通道子类型(RCS)。按照布尔代数,它可以具有  $2^6 = 64$  种不同的可能通道形式,对应最小项  $m_i, i = 0 \sim 63$ ,例如  $m_7 = 000111$  代表 OODEF 型的子类型,它的 D, E 和 F 是研究中所涉及的光场,而 A, B 和 C 3 个通道没有相关光场。

但是,在具体的四能级光学量子相干效应实验

中,应该最少涉及 3 个光学辐射场,而且并非全部 A~F 通道中的任意 3 个同时符合电偶极跃迁定则,因此就要把 A-B-E, B-C-D, A-D-F 和 C-E-F 共存的所有子类型均排除,所以现实通道子类型将远达不到 64 种。

首先,考虑  $m_{0\sim 15}$  这 16 个最小项所对应的可能通道子类型,如表 1 所示,其中 0 代表相应通道没有相关光场,而 1 代表相应位置施加或产生了光场。该表给出的可能子类型的共同特点是:在 A 和 B 两个通道上均没有相关光场被施加或产生。

表 1  $00\times\times\times$ 型现实通道子类型的挑选  
Table 1 Selecting result of  $00\times\times\times$ -type RCSs

A	B	C	D	E	F	$m_{0\sim 15}$
		0	0	0	0	$\times$
		0	0	0	1	$\times$
		0	0	1	0	$\times$
		0	0	1	1	$\times$
		0	1	0	0	$\times$
		0	1	0	1	$\times$
		0	1	1	0	$\times$
		0	1	1	1	$m_7$
0	0	1	0	0	0	$\times$
		1	0	0	1	$\times$
		1	0	1	0	$\times$
		1	0	1	1	$\times$
		1	1	0	0	$\times$
		1	1	0	1	$m_{13}$
		1	1	1	0	$m_{14}$
		1	1	1	1	$\times$

由于  $m_{0\sim 6}, m_{8\sim 10}$  和  $m_{12}$  所代表的可能子类型中没有达到 3 个光场,所以不是现实的子类型而被排除,在表中对应处用  $\times$  表示。而  $m_{11}$  和  $m_{15}$  所代表的可能子类型均违反了 C-E-F 的不可共存性,也不是现实的子类型而被排除。于是,剩下  $m_7, m_{13}$  和  $m_{14}$  所代表的 3 种可能子类型为现实通道子类型,如图 2(a)~(c) 所示。

考虑  $m_{16\sim 31}$  这 16 个最小项所对应的可能通道子类型,如表 2 所示。该表给出的可能子类型的共同特点是:在 A 通道上均没有相关光场被施加或产生,而在 B 通道上均有相关光场被施加或产生。

由于  $m_{16\sim 18}, m_{20}$  和  $m_{24}$  所代表的可能子类型中没有达到 3 个光场,所以不是现实的子类型而被排除。而  $m_{27}$  和  $m_{28\sim 31}$  所代表的可能子类型分别违反了 C-E-F 和 B-C-D 的不可共存性,也不是现实的子类型而被排除。于是,剩下  $m_{19}, m_{21\sim 23}$  和  $m_{25\sim 26}$  所代表的 6 种可能子类型为现实通道子类型,如图 3(a)~(f) 所示。

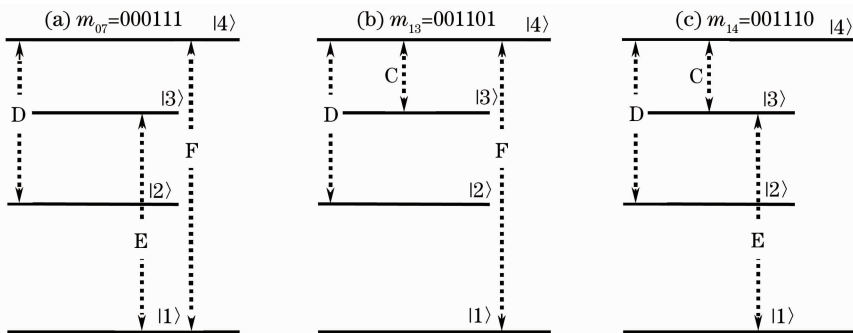


图 2 最小项(a) $m_7$ , (b) $m_{13}$  和(c) $m_{14}$  所代表的现实通道子类型

Fig. 2 RCSs represented by the minterms (a)  $m_7$ , (b)  $m_{13}$  and (c)  $m_{14}$

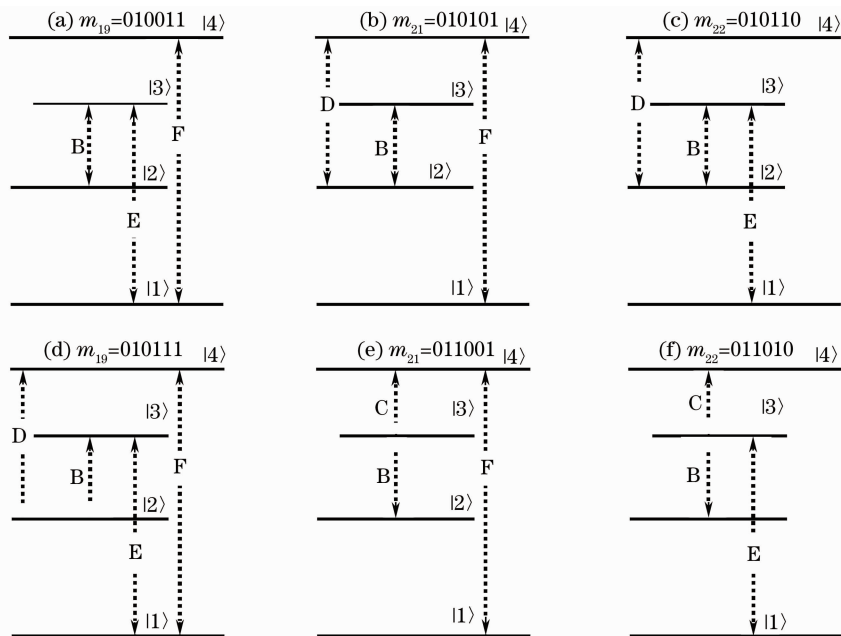


图 3 最小项(a) $m_{19}$ , (b) $m_{21}$ , (c) $m_{22}$ , (d) $m_{23}$ , (e) $m_{25}$  和(f) $m_{26}$  所代表的现实通道子类型

Fig. 3 RCS represented by the minterms (a)  $m_{19}$ , (b)  $m_{21}$ , (c)  $m_{22}$ , (d)  $m_{23}$ , (e)  $m_{25}$  and (f)  $m_{26}$

表 2 OB××××型现实通道子类型的挑选

Table 2 Selecting result of OB××××-type RCSs

A	B	C	D	E	F	$m_{16\sim 31}$
		0	0	0	0	×
		0	0	0	1	×
		0	0	1	0	×
		0	0	1	1	$m_{19}$
		0	1	0	0	×
		0	1	0	1	$m_{21}$
		0	1	1	0	$m_{22}$
0	1	0	1	1	1	$m_{23}$
		1	0	0	0	×
		1	0	0	1	$m_{25}$
		1	0	1	0	$m_{26}$
		1	0	1	1	×
		1	1	0	0	×
		1	1	0	1	×
		1	1	1	0	×
		1	1	1	1	×

考虑  $m_{32\sim 47}$  这 16 个最小项所对应的可能通道子类型,如表 3 所示。该表给出的可能子类型的共同特点是:在 A 通道上均有相关光场被施加或产生,而在 B 通道上均没有相关光场被施加或产生。

由于  $m_{32\sim 34}$ ,  $m_{36}$  和  $m_{40}$  所代表的可能子类型中没有达到 3 个光场,所以不是现实的子类型而被排除。而  $m_{37}$ ,  $m_{39}$ ,  $m_{43}$ ,  $m_{45}$  和  $m_{47}$  所代表的可能子类型分别违反了 A-D-F 和 C-E-F 的不可共存性,也不是现实的子类型而被排除。于是,剩下  $m_{35}$ ,  $m_{38}$ ,  $m_{41}$ ,  $m_{42}$ ,  $m_{44}$  和  $m_{46}$  所代表的 6 种可能子类型为现实通道子类型,如图 4(a)~(f)所示。

考虑  $m_{48\sim 63}$  这 16 个最小项所对应的可能通道子类型,如表 4 所示。该表给出的可能子类型的共同特点是:在 A 和 B 通道上均有相关光场被施加或产生。

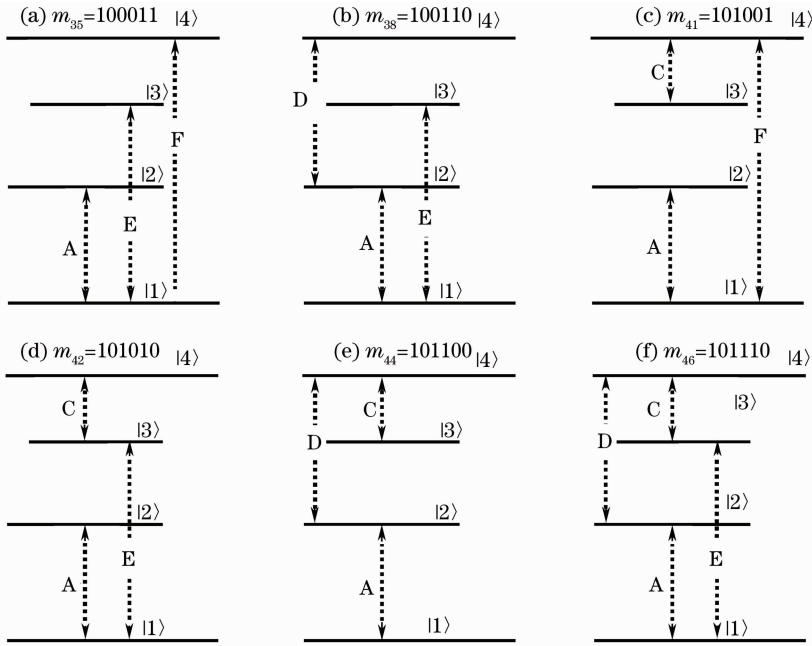


图 4 最小项(a) $m_{35}$ , (b) $m_{38}$ , (c) $m_{41}$ , (d) $m_{42}$ , (e) $m_{44}$ 和(f) $m_{46}$ 所代表的现实通道子类型

Fig. 4 RCSs represented by the minterms (a)  $m_{35}$ , (b)  $m_{38}$ , (c)  $m_{41}$ , (d)  $m_{42}$ , (e)  $m_{44}$  and (f)  $m_{46}$

表 3 AO××××型现实通道子类型的挑选

表 4 AB××××型现实通道子类型的挑选

Table 3 Selecting result of AO××××-type RCSs

Table 4 Selecting result of AB××××-type RCSs

A	B	C	D	E	F	$m_{32-47}$
		0	0	0	0	×
		0	0	0	1	×
		0	0	1	0	×
		0	0	1	1	$m_{35}$
		0	1	0	0	×
		0	1	0	1	×
		0	1	1	0	$m_{38}$
1	0	0	1	1	1	×
		1	0	0	0	×
		1	0	0	1	$m_{41}$
		1	0	1	0	$m_{42}$
		1	0	1	1	×
		1	1	0	0	$m_{44}$
		1	1	0	1	×
		1	1	1	0	$m_{46}$
		1	1	1	1	×

A	B	C	D	E	F	$m_{48-63}$
		0	0	0	0	×
		0	0	0	1	$m_{49}$
		0	0	1	0	×
		0	0	1	1	×
		0	1	0	0	$m_{52}$
		0	1	0	1	×
		0	1	1	0	×
1	1	0	1	1	1	×
		1	0	0	0	$m_{56}$
		1	0	0	1	$m_{57}$
		1	0	1	0	×
		1	0	1	1	×
		1	1	0	0	×
		1	1	0	1	×
		1	1	1	0	×
		1	1	1	1	×

由于  $m_{48}$  所代表的可能子类型中没有达到 3 个光场, 所以被排除。而  $m_{50-51}$ ,  $m_{54-55}$ ,  $m_{58-59}$  和  $m_{62-63}$  所代表的可能子类型违反了 A-B-E 的不可共存性被排除,  $m_{53}$  所代表的可能子类型违反了 A-D-F 的不可共存性被排除,  $m_{60-61}$  所代表的可能子类型违反了 B-C-D 的不可共存性被排除。于是, 剩下  $m_{49}$ ,  $m_{52}$  和  $m_{56-57}$  所代表的 4 种可能子类型为现实通道子类型, 如图 5(a)~(d) 所示。

OOODEF, OOCDOF, OOCDEO, OBBOEF, OBODOF, OBODEO, OBODEF, OBCOOF, OBCEOE, AOOOEF, AOODEO, AOCCOF, AOCCOE, AOCCOO, AOCCDEO, ABBOOF, ABODOO, ABCOOO 和 ABCOOF, 分别对应 6 变量逻辑最小项  $m_{07}$ ,  $m_{13-14}$ ,  $m_{19}$ ,  $m_{21-23}$ ,  $m_{25-26}$ ,  $m_{35}$ ,  $m_{38}$ ,  $m_{41-42}$ ,  $m_{44}$ ,  $m_{46}$ ,  $m_{49}$ ,  $m_{52}$ ,  $m_{56}$  和  $m_{57}$ , 其中涉及 3 个通道的有 17 种, 涉及 4 个通道的有 2 种, 尽管没有发现具有 5 个和 6 个光场的现实通道子类型,

最后得到 19 种现实通道子类型:

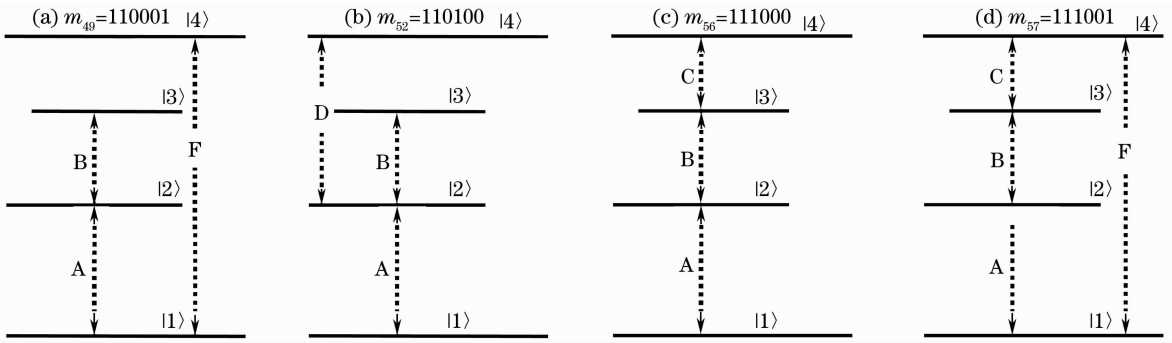


图 5 最小项(a) $m_{49}$ , (b) $m_{52}$ , (c) $m_{56}$ 和(d) $m_{57}$ 所代表的现实通道子类型

Fig. 5 RCS represented by the minterms (a)  $m_{49}$ , (b)  $m_{52}$ , (c)  $m_{56}$  and (d)  $m_{57}$

但也表现出了不易想象的结构多样性和复杂性。在目前已经有一些研究报道中,相对多的依然是作为名称来源的 ABCOOO 型( $m_{56}$ )<sup>[11~25]</sup>,其它类型很少有人涉及<sup>[26~30]</sup>。

当然,如果  $E_3$  (通道 C) 能量很小,对应的光子频率位于微波区的情况,我们不认为属于级联型,而将之归为 Y 型。

考虑更加实际的实验情况后,发现即使使用同一种子类型,具体的激光场仍然有强-弱、左-右偏振、连续-脉冲等方面的差别,可以实现几乎无穷多的不同的研究目的。如果只将激光场区分以强和弱,那么各现实通道子类型又可区分为更多的现实强度子类型(RIS)。

#### 4 级联四能级系统的现实强度子类型

在实际的光学量子相干实验中,一般用拉比频率  $\Omega_c, \Omega_p, \Omega_d$  或  $\Omega_s$  来分别描述控制光、抽运/探测光、驱动光或信号光的光场强度,同时强光场一般可以按经典光来处理,而弱光一般按量子化光场来处理。如果用大写斜体字母  $A \sim F$  来表示该光场是强光场,用小写斜体字母  $a \sim f$  来表示该光场是弱光场,用  $o$  来表示没有光场,那么各种现实通道子类型按强弱进行的进一步分类仍然可以使用布尔代数方法来处理。例如,对于 3 通道 ABCOOO 子类型,共有  $2^3 = 8$  种施加或产生光场的情况

$$\begin{cases} a & b & c & o & o & o \\ a & b & C & o & o & o \\ a & B & c & o & o & o \\ a & B & C & o & o & o \end{cases} \quad \text{和} \quad \begin{cases} A & b & c & o & o & o \\ A & b & C & o & o & o \\ A & B & c & o & o & o \\ A & B & C & o & o & o \end{cases}$$

如果用粗线来表示强的经典光场,用细线来表示弱的量子化光场,用虚线来表示产生的光场,则外加三个光场的  $oBodEf$  和  $oboDEf$  子类型的四波混频系统可以用图 6 来描绘。

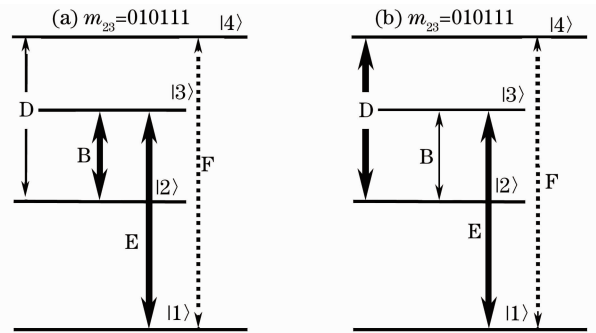


图 6 OBODEF 现实通道子类型的两个现实强度子类型

(a)  $oBodEf$  和 (b)  $oboDEf$

Fig. 6 Two RISs of the OBODEF-type RCS. (a)  $oBodEf$  and (b)  $oboDEf$

于是,对于任何一个具有 3 个光场的现实通道子类型,它都有 8 个现实强度子类型,而对于任何一个具有 4 个光场的现实通道子类型,它都有 16 个现实强度子类型,则级联四能级结构总计具有  $2^3 \times 17 + 2^4 \times 2 = 168$  种现实强度子类型。

这里现实强度子类型只是对光场做了简单的强弱区分,并未涉及其它方面的不同。例如,在具体应用中必须考虑相位匹配条件,以达到预期的物理目的,而方法之一就是选择适当的能级系统和失谐量,来增加相位匹配<sup>[31]</sup>。至于不同的连续-脉冲型等其它光场给出的子类型,同样会具有相当的复杂性,本文就不做深入探讨了。

#### 5 结 论

本文利用布尔代数方法,按照可能存在的跃迁通道,结合电偶极跃迁选择定则,研究了级联四能级系统的通道子类型,得到了 17 个三通道和 2 个四通道的现实通道子类型。然后,仅仅按照涉及的光场的强弱来区分,又得到了 168 种现实强度子类型。这些子类型的分类预示了涉及级联四能级系统在光学量子相干效应方面的研究成果会大量涌现,对研

究人员整体把握级联四能级系统结构会有很大的帮助。同时,这种子类型的结构多样性对归纳已有的研究成果,充分利用其它各种子类型来进行量子光学、量子信息科学和精密光谱学等理论及应用研究具有指导作用。

### 参 考 文 献

- Wang Li, Song Haizhen, Xiao Shaowu. Influence of laser-field linewidth on atomic coherence effect in four-level atomic system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 194~199  
王 丽, 宋海珍, 肖绍武. 激光场线宽对四能级原子系统相干效应的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 194~199
- Chen Xueyuan, Luo Zundu. Four-level model of photon avalanche upconversion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 19~23  
陈学元, 罗遵度. 光子雪崩上转换的四能级模型[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 19~23
- Luo Gengxian, Guo Guangcan. Four-level atomic system resonantly pumped by double-wave fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(6): 494~501  
罗耕贤, 郭光灿. 双波场共振泵浦的四能级原子系统[J]. *光学学报*, 1988, **8**(6): 494~501
- Du Shengwang, P. Kolchin, C. Belthangady *et al.*. Subnatural linewidth biphotons with controllable temporal length[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(18): 183603
- J. B. Kim, K. Kim, H. S. Moony *et al.*. Enhancement of electromagnetically induced absorption in Cs atoms[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2001, **39**(5): 859~863
- Sun Qingqing, Gu Ying, Gong Qihuang. Combination of electromagnetically induced transparency and a Mollow absorption spectrum in a degenerate two-level atomic ensemble[J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, **51**(13): 1899~1909
- Yang Lijun, Zhang Lianshui, Zhuang Zhonghong *et al.*. Spectral feature with sub-natural linewidth due to quantum interference in a four-level system[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(6): 2147~2151
- Zhang Yanliang, Zhang Xunli, Sun Zhenrong *et al.*. Double electromagnetically induced transparency and ultra-narrow linewidth in Y-type energy level system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 563~567  
张衍亮, 张循利, 孙真荣等. Y型四能级中的双电磁感应透明和超窄吸收[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 563~567
- Meng Dongdong, Liu Xiaodong, Zheng Yu *et al.*. Structure multiformity of inverted Y-type four-level optical quantum coherent systems[J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **6**(1): 65~68
- Nie Zhiqiang, Li Ling, Jiang Tong *et al.*. Three-photon absorption and dispersion of sub-femtosecond polarization beat in reverse V-type four-level [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 243~251  
聂志强, 李 岭, 姜 彤等. 倒 V 形四能级亚飞秒极化拍的三光子吸收和色散[J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 243~251
- Zeng Zhiqiang, Hou Bangpin. Effects of vacuum-induced coherence on the single and two-photon transparency in a four-level ladder atomic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 251~256  
曾志强, 侯邦品. 真空场诱导相干对梯形四能级原子系统中单光子和双光子透明的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 251~256
- Sun Jiang, Mi Xin, Yu Zuhe *et al.*. Suppression and enhancement in parametric two-photon resonant nondegenerate four-wave mixing via quantum interference [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(2): 306~309
- Yang Xiaoxue, Wei Hua, Wu Ying. Analytical expression of efficiency for an ultraslow light four-wave mixing scheme [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(5): 1134~1136
- Sun Jiang, Zuo Zhanchun, Mi Xin *et al.*. Two-photon resonant nondegenerate four-wave mixing via quantum interference [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1): 149~154  
孙 江, 左战春, 米 辛等. 引入量子干涉的双光子共振非简并四波混频[J]. *物理学报*, 2005, **54**(1): 149~154
- Zuo Zhanchun, Sun Jiang, Wu Lingang *et al.*. Doppler-free three-photon resonant six-wave mixing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1186~1190  
左战春, 孙 江, 吴令安等. 消多普勒三光子共振六波混频[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1186~1190
- Zuo Zhanchun, Liu Xia, Sun Jiang *et al.*. Control of polarization interference in Doppler broadened two-photon resonant four-wave mixing system [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(3): 625~628
- Zuo Zhanchun, Sun Jiang, Liu Xia *et al.*. Atomic coherence in nondegenerate four-wave mixing [J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(4): 1042~1046
- S. N. Sandhya. The effect of atomic coherence on absorption in four-level atomic systems [J]. *J. Phys. B*, 2007, **40**(5): 837~849
- Jin Luling, Sun Hui, Niu Yueping *et al.*. Sub-half-wavelength atom localization via two standing-wave fields [J]. *J. Phys. B*, 2008, **41**(8): 085508
- S. N. Sandhya. Interference effects in atomic coherent systems: spectral features [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **217**(1): 291~297
- Wang Yanhui, Hao Liang, Zhou Xiang *et al.*. Behavior of quantum coherence of  $\equiv$ -type four-level atom under bang-bang control [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(18): 4793~4799
- Wu Ying. Efficient multiwave mixing in the ultraslow propagation regime and the role of multiphoton quantum destructive interference [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(19): 2294~2296
- Li Huijun, Huang Guoxiang. Two-component spatial optical solitons in a four-state ladder system via electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Lett. A*, 2008, **372**(22): 4127~4134
- B. K. Dutta, P. K. Mahapatra. Nonlinear optical effects in a doubly driven four-level atom [J]. *Phys. Scripta*, 2007, **75**(3): 345~353
- Wu Ying. Two-color ultraslow optical solitons via four-wave mixing in cold-atom media [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(5): 053820
- S. A. Hadjiagapiou. Absorption spectrum of a four-level atom with injected squeezed vacuum [J]. *Journal of Modern Optics*, 2001, **48**(1): 35~45
- L. Deng, M. G. Payne, W. R. Garrett. Four-wave mixing with short pulses and optimized atomic coherence [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **63**(4): 043811
- E. Brekke, J. O. Day, T. G. Walker. Four-wave mixing in ultracold atoms using intermediate Rydberg states [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(6): 063830
- Zhang Hongjun, Niu Yueping, Sun Hui *et al.*. Phase control of switching from positive to negative index material in a four-level atomic system [J]. *J. Physics B*, 2008, **41**(12): 125503
- Li Jiahua, Chen Aixi, Peng Jucun. Four-wave mixing scheme in a four-level ladder-type atomic system based on electromagnetically induced transparency [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(6): 1075~1078
- M. Johnsson, E. Korsunsky, M. Fleischhauer. Eliminating nonlinear phase mismatch in resonantly enhanced four-wave mixing [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **212**(4-6): 335~341