

三能级稳态雪崩上转换过程的计算分析*

毛育红 陈晓波 张光寅 董 科 李美仙**

(南开大学物理系, ** 电教中心, 天津 300071)

提要 通过建立速率方程组,分析和讨论了三能级稳态雪崩上转换过程的特点。

关键词 雪崩上转换, 阈值

1 引 言

雪崩上转换是一种特殊的非线性激发机制,目前在掺 Pr^[1], Nd^[2], Tm^[3] 的稀土材料中都已观察到以雪崩吸收过程泵浦的上转换激光作用。在这种激发过程中,泵浦光的波长位于与稀土离子激发态之间的跃迁相共振处而不与基态的电子跃迁共振。在接通泵浦光时,吸收缓慢,然后在超过亚稳态寿命的时间尺度上建立平衡。随着泵浦光强增大,雪崩建立时间变短,平衡吸收增强,导致可用“光子雪崩”或“吸收雪崩”来描述的有效上转换激发过程。我们曾对四能级的雪崩上转换系统进行分析^[4],而在掺 Er 等离子体的稀土材料中,三能级的雪崩上转换系统也是常见的情形。本文通过建立激发过程的速率方程组,分析和讨论三能级系统中雪崩上转换过程的特点。

2 理论分析

考虑图 1 所示的三能级雪崩上转换系统。能级 1 为基态,泵浦光与激发态能级 2, 3 之间的跃迁发生共振,粒子通过交叉弛豫 P 的作用在能级 2 上集居,由图 1 可以建立如下的速率方程组:

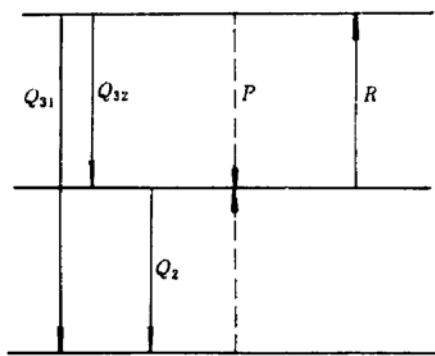


Fig. 1 Three-level avalanche upconversion system

$$\frac{dn_1}{dt} = Q_{31}n_3 + Q_2n_2 - Pn_1n_3$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -Rn_2 + (Q_{32} + R)n_3 + 2Pn_1n_3 - Q_2n_2$$

$$\frac{dn_3}{dt} = -Q_3n_3 - Rn_3 + Rn_2 - Pn_1n_3$$

$$n_1 + n_2 + n_3 = 1$$

其中, n_i 为能级 i 的布居数, Q_{ij} 为能级 i 至能级 j 的

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994 年 6 月 27 日

辐射跃迁和无辐射跃迁速率之和。 Q_i 表示能级 i 向下能级跃迁的速率之和。 P 表示交叉弛豫跃迁速率, R 为泵浦光的激发速率。我们感兴趣的是发生雪崩吸收后达到稳态时速率方程的解, 令 $dn_i/dt = 0$, 可得到下述稳态解:

$$n_1 = \frac{(Q_3 + R)Q_2 + Q_{31}R}{P(R - Q_2)}$$

$$n_2 = \frac{PR - PQ_2 - (Q_3 + R)Q_2 - RQ_{31}}{P(2R + Q_3 + Q_{31} - Q_2)} \cdot \frac{Q_3 + Q_{31} + R}{R - Q_2}$$

$$n_3 = \frac{PR - PQ_2 - (Q_3 + R)Q_2 - RQ_{31}}{P(2R + Q_3 + Q_{31} - Q_2)}$$

要使这一组解物理存在, 必须满足 $0 \leq n_i \leq 1$ 。从而可以得到发生雪崩吸收需要满足的条件:

- (1) 在本文讨论的三能级系统下, 材料的交叉弛豫跃迁速率必须满足 $P > Q_{31} + Q_2$;
- (2) 泵浦光强度存在阈值泵浦强度, 在三能级系统中, 其值由下式确定:

$$R_c = \frac{P + Q_3}{P - Q_{31} - Q_2} Q_2$$

其中 R_c 为泵浦光达到阈值时的泵浦激发速率。

3 讨论与分析

定义 $b = Q_{31}/Q_3 + Q_2/Q_3$, 三能级雪崩系统与四能级雪崩系统的阈值条件具有完全相同的形式, 在稳态速率方程的解中, 改写 n_1 为:

$$n_1 = \frac{Q_3 Q_2 + b Q_3 R}{P(R - Q_2)}$$

则它也和四能级系统中 n_1 的表达式具有相同的形式。因而三能级和四能级系统具有相同的阈值 R_c 与交叉弛豫 P , 布居数 n_1 与泵浦光激发速率 R 的关系曲线。从图 2 可以看到, b 值的减小有利于雪崩效应的增强。由于三能级系统的 b 值多了一项 Q_2/Q_3 , 它的雪崩效应相对弱于四能级系统。在给定的 Q_3/Q_2 值条件下, 图 3 给出了 n_2, n_3 随 R 的变化曲线, 与四能级系统相应的曲线相比, 能级 2 上的布居数随 R 的增大而由最大值开始减小的速度平缓得多。 n_2, n_3 的布居数并没有出现反转的情况。

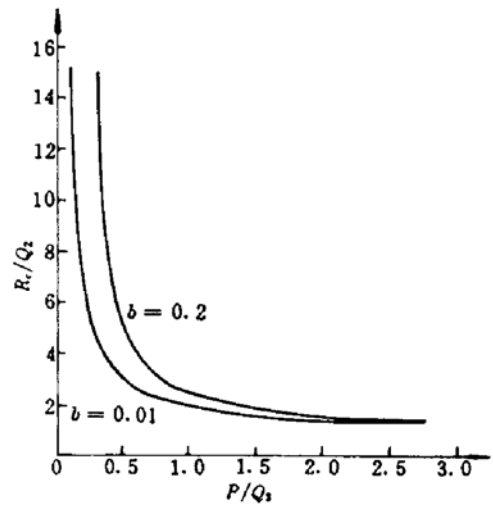


Fig. 2 Threshold excitation rate versus relaxation rate

图 4 给出了在一定泵浦速率下布居数随交叉弛豫跃迁几率的变化曲线, 可以看到, 只要材料的交叉弛豫跃迁速率达到临界值, 各能级的布居数就会迅速随 P 的进一步增加而趋向于它们的极限值。在四能级系统中, 存在一个与交叉弛豫速率无关的泵浦光激发速率值, 使得激发态 2, 3 间布居数反转, 三能级系统雪崩过程都不会出现布居数反转。

4 结论

由以上的分析, 可以看到三能级和四能级的两种雪崩上转换系统都具有它们共同的特点:

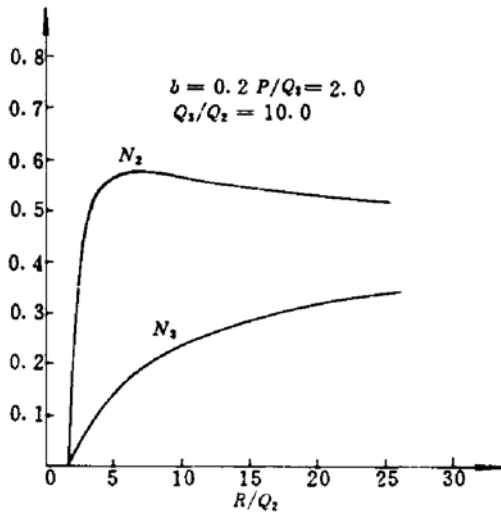


Fig. 3 Populations on level 2 and level 3 versus pumping excitation rate

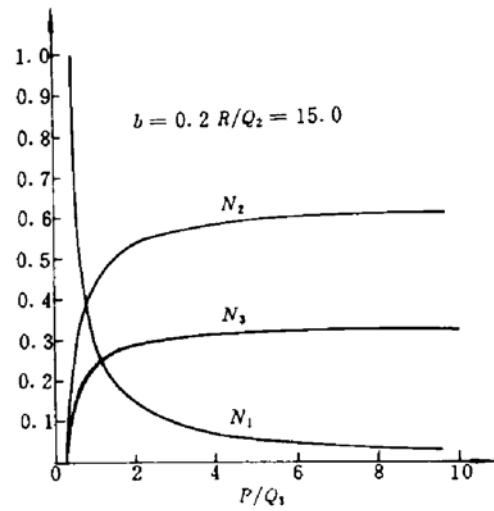


Fig. 4 Populations on each level versus cross-relaxation transition rate

材料的交叉弛豫作用必须大于一个临界值,泵浦光的强度也存在一个阈值。区别在于三能级系统的雪崩效应相对要弱于四能级系统,在三能级雪崩系统中,不会象四能级系统那样出现激发态能级 2, 3 间的布居数反转。

参 考 文 献

- 1 A. W. Kueny, W. E. Case, M. E. Koch. Nonlinear-optical absorption through photon avalanche. *Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(4):639
- 2 W. Lenth, R. M. Macfarlane. Excitation mechanisms for upconversion lasers. *J. of Luminescence*, 1990, **45**: 346
- 3 H. Ni, S. C. Rand. Avalanche upconversion in Tm:YAlO₃. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(18):1424
- 4 毛育红, 陈晓波. 物理学报, 待发表

Analysis of the Equilibrium State of a Three-level Avalanche Upconversion System

Mao Yuhong Chen Xiaobo Zhang Guangyin Dong Ke Li Meixian

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract Properties of a three-level avalanche upconversion system are investigated using a rate equation analysis of the equilibrium state.

Key words avalanche, upconversion, threshold