

# 两束脉冲激光在级联的三能级系统中的传播

肖 玲 林福成

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 利用密度矩阵方程和麦克斯韦传播方程的耦合并且考虑激光脉冲的横向效应, 在柱对称的条件下, 研究了两束脉冲在级联系统中的共振传播, 考察了脉冲在光学厚介质中的时空演化过程。数值计算中考虑了两个上能级的自发辐射速率, 给出了脉冲能量的空间演化及电离粒子在空间的分布。

**关键词** 级联系统, 横向效应, 能量的空间演化, 电离粒子。

自从 McCall 和 Hahn<sup>[1]</sup> 在 1969 年提出自感应透明效应以来, 相干光脉冲与原子相互作用的研究一直是广泛探讨的领域<sup>[2~4]</sup>, 如相干光与原子的相互作用导致了脉冲的分裂与延迟, 准稳态条件下考虑了横向作用的光脉冲的自聚焦与散焦现象<sup>[5~9]</sup>。作者所在研究小组在对相干光在具有损耗机制的能级系统中的传播分析的基础上<sup>[10, 11]</sup>, 进一步考虑了一定光束半径的脉冲在具有损耗机制的介质中的传播<sup>[12]</sup>。

以前的工作主要集中在激光与二能级系统的相互作用, 而对于脉冲在三能级系统的传播, 则很少涉及。而实际工作中经常遇到的是多束激光的传播, 所以研究多束激光脉冲在介质中的传播对某些工作是有意义的。本文主要研究了两束激光脉冲在三能级原子蒸气中共振传播, 并且考虑了实际激光的横向半径的效应, 以及上能级的自发辐射和强的电离效应。

## 1 理 论

考虑一个如图 1 所示具有电离效应的三能级系统, 频率为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  的两束激光脉冲分别与  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$ 、 $|2\rangle$  和  $|3\rangle$  能级跃迁共振。能级  $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$  各自到能级  $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$  的自发辐射速率为  $\gamma_{21}$ 、 $\gamma_{32}$ ,  $\gamma$  为能级  $|3\rangle$  到连续态的电离速率。两束入射激光场都采用脉冲形式, 如果通过的介质满足柱对称, 两束激光的电场可表示为:

$$E_i(z, r, t) = (1/2) \{ e_i \epsilon_i(z, r, t) \exp [j(k_i z - \omega t)] + c. c. \} \quad (1)$$

其中  $e_i (i = 1, 2)$  为激光场偏振方向的单位矢量,  $\epsilon_i(z, r, t)$  为脉冲的复振幅,  $k_i$  为波矢量。利用密度矩阵方程, 采用电偶近似, 可导出介质原子与光场相互作用的密度矩阵元方程组:

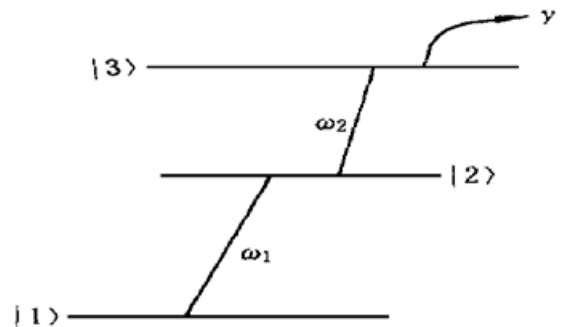


Fig. 1 Energy-level diagram

$$\left. \begin{aligned}
 \partial \rho_{11} / \partial \tau &= (j/2) (\mu_1 \epsilon_1^* \rho_{21} / \hbar - \mu_1 \epsilon_1 \rho_{12} / \hbar) \\
 \partial \rho_{22} / \partial \tau &= -\gamma_{21} \rho_{22} + (j/2) (\mu_1 \epsilon_1 \rho_{12} / \hbar - \mu_1 \epsilon_1^* \rho_{21} / \hbar + \mu_2 \epsilon_2^* \rho_{32} / \hbar - \mu_2 \epsilon_2 \rho_{23} / \hbar) \\
 \partial \rho_{33} / \partial \tau &= -(\gamma_{32} + \gamma) \rho_{33} + (j/2) (\mu_2 \epsilon_2 \rho_{23} / \hbar - \mu_2 \epsilon_2^* \rho_{32} / \hbar) \\
 \partial \rho_{21} / \partial \tau &= -\gamma_{21} \rho_{21} / 2 + (j/2) [\mu_1 \epsilon_1 (\rho_{11} - \rho_{22}) / \hbar + \mu_2 \epsilon_2^* \rho_{31} / \hbar] \\
 \partial \rho_{31} / \partial \tau &= -[(\gamma_{32} + \gamma) / 2] \rho_{31} + (j/2) (\mu_2 \epsilon_2 \rho_{21} / \hbar - \mu_1 \epsilon_1 \rho_{32} / \hbar) \\
 \partial \rho_{32} / \partial \tau &= -[(\gamma_{32} + \gamma_{21} + \gamma) / 2] \rho_{32} + (j/2) [\mu_2 \epsilon_2 (\rho_{22} - \rho_{33}) / \hbar - \mu_1 \epsilon_1^* \rho_{31} / \hbar]
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

采用麦克斯韦方程来描述激光场的传播, 取慢变幅近似和伽利略变化 ( $\tau = t - z/c$ ) 可分别得到两束脉冲的传播方程:

$$\nabla_r^2 \epsilon_1 + 2jk_1 \partial \epsilon_1 / \partial \xi = -N \mu_1 \mu_0 \omega_1^2 \langle \hat{\rho}_{21} \rangle, \quad \nabla_r^2 \epsilon_2 + 2jk_2 \partial \epsilon_2 / \partial \xi = -N \mu_2 \mu_0 \omega_2^2 \langle \hat{\rho}_{32} \rangle \quad (3)$$

$N$  为介质的原子数密度,  $\mu_1$  与  $\mu_2$  分别为原子在能级  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$ 、 $|2\rangle$  和  $|3\rangle$  间的跃迁偶极矩。由 (2) 式、(3) 式可看出, 传播过程中脉冲场间的相互影响是通过它们与原子之间的相互作用而实现的, 这种相互作用体现在密度矩阵元的变化是相互关联的。

一般情况下求联立方程组 (2) 式、(3) 式的解析解是很困难的, 所以借助于数值解法。(2) 式只是时间  $\tau$  的偏微分方程, 在时间方向上, 应用预报-校正法进行求解<sup>[13]</sup>。(3) 式是在  $r$  与  $z$  方向上具有可变系数的抛物线型偏微分方程, 在空间坐标上, 应用隐式差分法以保证计算结果的稳定<sup>[13]</sup>。具体地说, 根据  $z$  点的  $\epsilon_i(z, r, \tau)$  值, 用 (2) 式先求解出  $z$  点的介质原子的响应  $\rho_{m,n}(z, r, \tau)$  ( $m, n = 1, 2, 3$ ), 再应用 (3) 式求解出下一空间点  $z + \Delta z$  的  $\epsilon_i(z + \Delta z, r, \tau)$  在  $r$  与  $\tau$  的分布。重复此步骤可依次求解出传播后各点脉冲强度。

## 2 数值计算及分析

在以下的数值计算中, 采用的模型原子的参数为: 原子密度  $N = 1.0 \times 10^{17} / \text{m}^3$ ; 两束激光分别与能级  $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$  及能级  $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$  共振, 相应的波长  $\lambda_1 = 589.0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 616.1 \text{ nm}$ ; 对应的介质跃迁偶极矩为  $\mu_{21} = 1.50 \times 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m}$ ,  $\mu_{32} = 0.461 \times 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m}$ ; 原子的自发辐射速率  $\gamma_{21} = 6.22 \times 10^7 / \text{s}$ ,  $\gamma_{32} = 5.6 \times 10^6 / \text{s}$ ; 系统的电离速率  $\gamma = 1.0 \times 10^8 / \text{s}$ 。考虑入射的激光脉冲波形均为高斯型, 两束脉冲的脉冲宽度相等  $T_p = 6 \text{ ns}$ ; 设激光脉冲强度在垂直于传播方向  $z$  的  $x-y$  平面上是对称分布的, 其分布也为高斯型, 令光强沿  $r$  ( $x-y$  平面的半径变量) 方向下降为轴上 ( $r = 0$ ) 光强的  $1/e$  的  $r$  值为其横向半径  $R_p$ , 取  $R_p = 0.5 \text{ cm}$ 。为简单计, 不考虑非均匀多普勒加宽。在此条件下, 考察介质中脉冲的传播行为及原子空间电离率的变化。

首先设输入的两束激光轴上 ( $r = 0$ ) 脉冲的面积为  $5\pi$ , 其输入脉冲波形如图 2 所示。传播后脉冲、脉冲能量的空间分布及空间各点原子的电离率如图 3~ 图 5 所示。

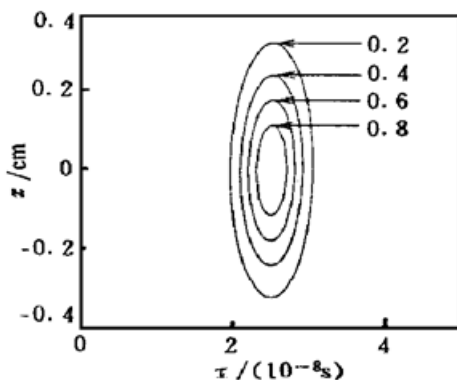


Fig. 2 Contour of the input pulses

图 3 的脉冲等高图表明传播后相比于输入脉冲在时空上的分布, 第一束激光出现延迟和空间上的形变, 而第二束激光脉冲变化很小。从图 4 可发现第一束激光脉冲在空间上能量很快减少, 越远离轴的地方, 能量消耗得越快; 而第二束激光脉冲的能量则减少得很慢。

图 5 中电离粒子的空间分布大体符合第一束脉冲能量的分布。由于介质对脉冲的空间调制及在横向方向上各脉冲截面的相互作用, 使得靠外的空间的电离率呈阶梯形振荡下降,

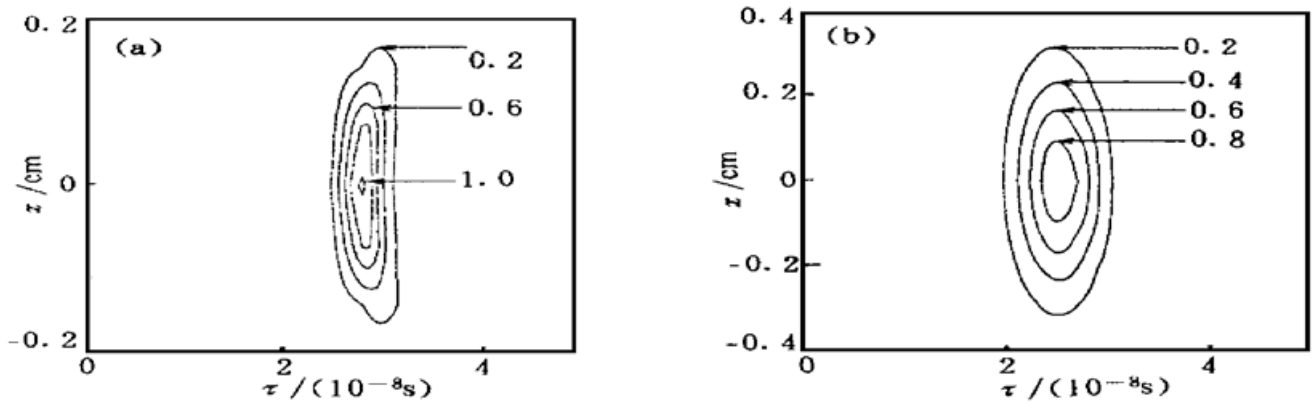


Fig. 3 Contour of pulses after propagation,  $z = 5$  cm. (a) First laser pulse, (b) Second laser pulse

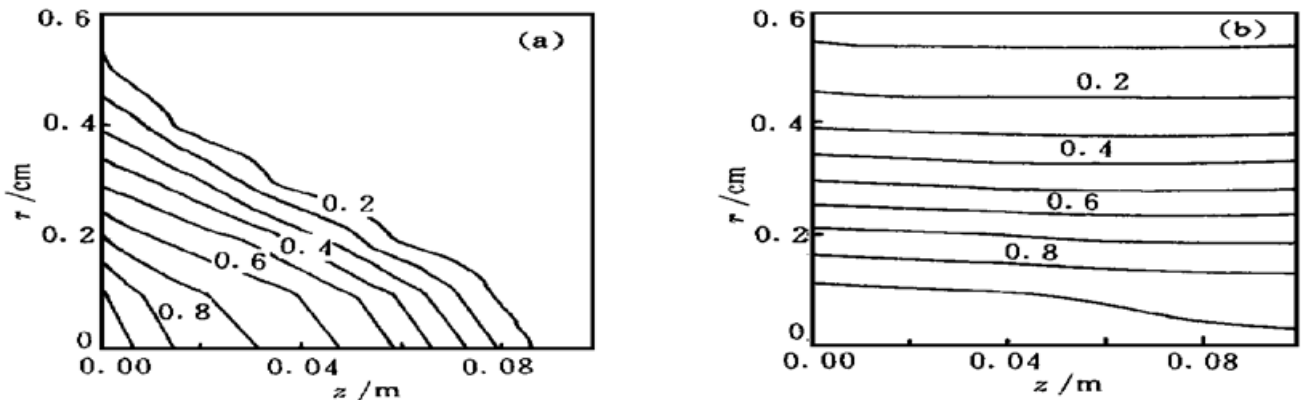


Fig. 4 The space evolution of energy of pulses. (a) First laser pulse, (b) Second laser pulse

在空间一些地方出现环状结构。当两束激光进入介质后, 由于第一步激发( $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ )先于第二步激发( $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ ), 所以第二束激光的脉冲前半部分基本没有变化; 传播过程中粒子在能级 $|2\rangle$ 总有一定的布居数, 即第一束脉冲的一部分能量转化为介质粒子的能量, 且能级 $|2\rangle$ 自发弛豫了一部分能量, 从而导致第一束脉冲的能量下降很快。随着传播距离的增大, 第一束脉冲的延迟导致了两束脉冲不重合, 第二束脉冲与介质作用的机会更加减少。虽然传播后第二束激光的能量剩余很多, 但没有第一束激光的激发, 也得不到有效的利用。

第一束脉冲轴上面积增大为 $10\pi$ , 其他参数不变。传播后脉冲能量脉冲的空间分布及空间各点原子的电离率如图 6~

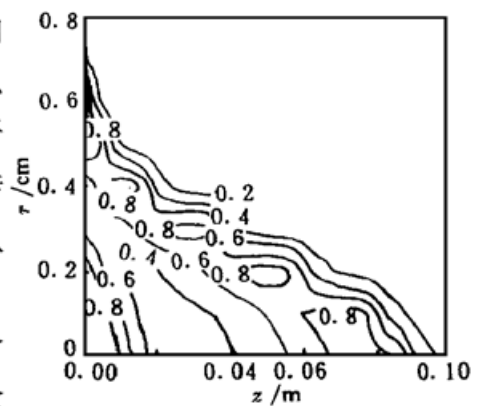


Fig. 5 Distribution of ionization particle in space

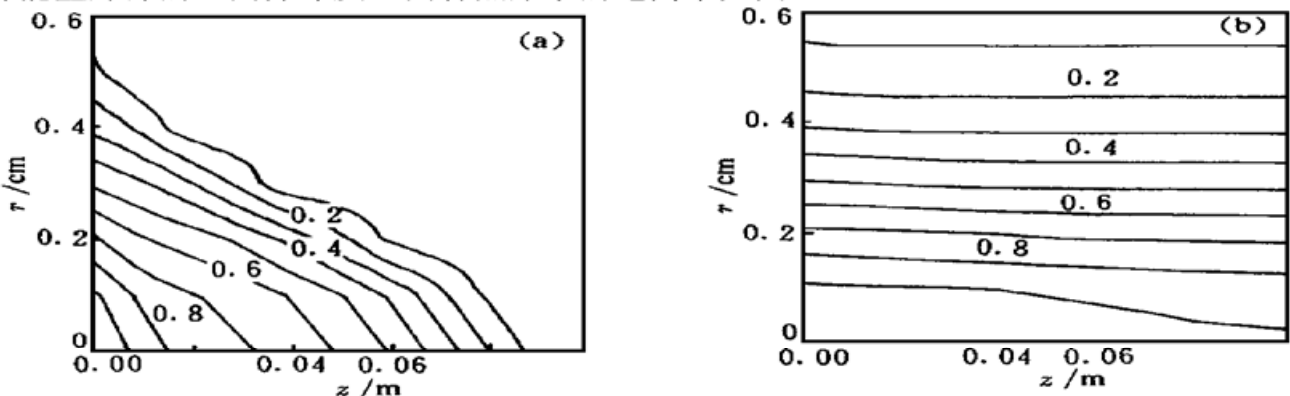


Fig. 6 The space evolution of energy of pulses. (a) First laser pulse, (b) Second laser pulse

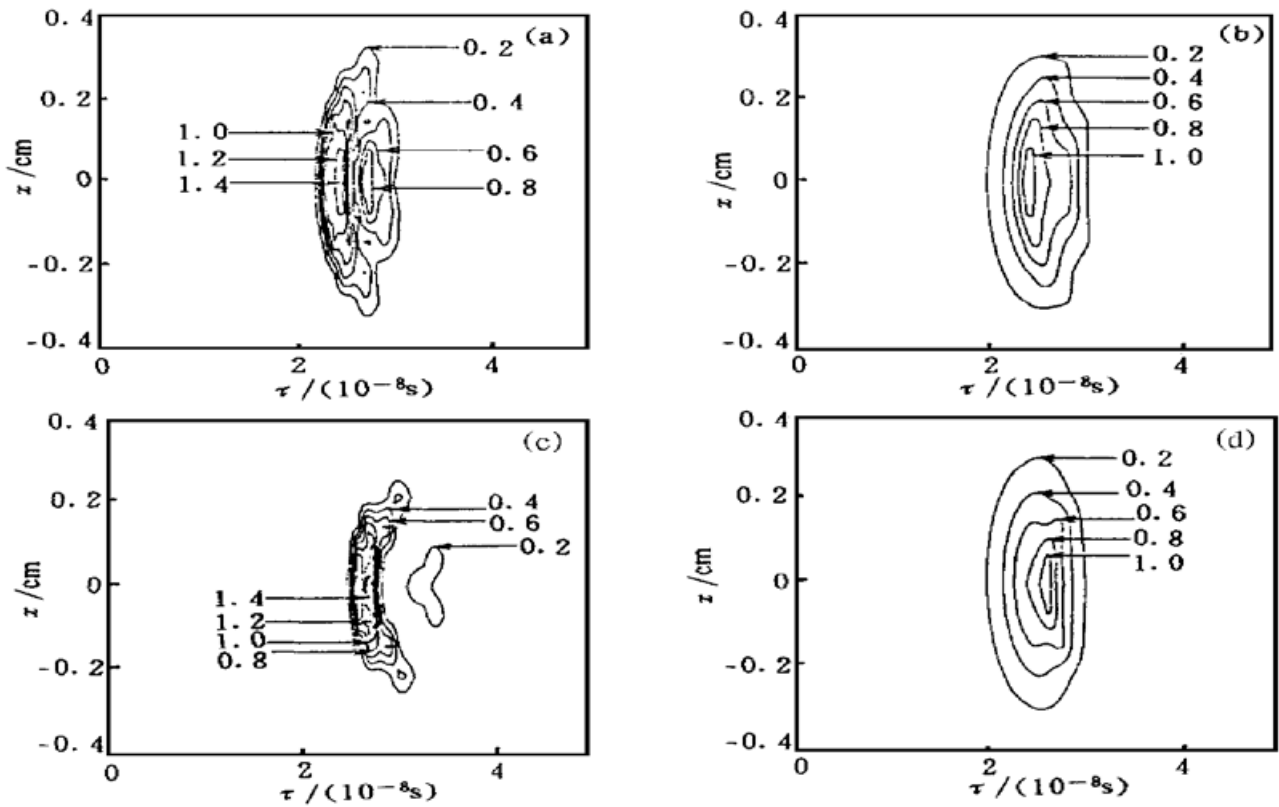


Fig. 7 Contour of pulses after propagation.  $z = 5$  cm for (a), (b);  $z = 15$  cm for (c), (d). (a) First laser pulse, (b) Second laser pulse, (c) First laser pulse, (d) Second laser pulse

图 8 所示。由于第一束脉冲在整个空间能量增大，脉冲传播的距离随之加长，第二束激光的能量分布的空间变化依然很小。

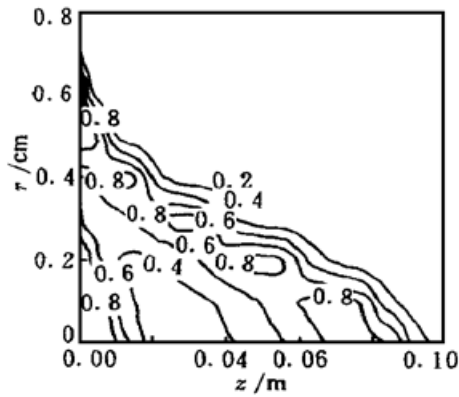


Fig. 8 Distribution of ionization particle in space

图 8 中粒子的空间电离分布范围更广，但靠外的空间的电离率仍呈阶梯形振荡下降，在空间一些地方出现环状结构。从图 6 可看出脉冲的时空演化。虽然第二束激光的能量变化很小，但增大第一束脉冲的拉比振荡频率后，第二束脉冲也有拉比振荡，所以其后半部分在时空的分布出现了一些小的畸变；而由于脉冲的拉比振荡，增大了能量的第一束激光出现了明显的畸变，并随着距离的增大而分裂。由于脉冲在不同的横向坐标  $r$  处截面的脉冲拉比振荡强度不同，横向方向各截面脉冲的延迟不同。

**结 论** 本文研究了两束激光脉冲在三能级级联系统中的传播，考察了脉冲传播过程中的能量分布及介质电离率的空间分布。在一定的参数下，第一束脉冲与介质的相互作用而导致了脉冲的延迟和形变，由于两级级联的激发过程，第二束激光脉冲的传播有一滞后效应，第二束激光脉冲的前半部分没有变化。由于传播过程中各能级上有一定粒子的布居以及能级自发弛豫的影响，第一束脉冲能量衰减得很快。没有第一束激光的激发，第二束激光的剩余能量得不到有效的利用。粒子的空间电离效率在靠外的空间呈阶梯形振荡下降，在空间一些地方出现环状结构。当增大第一束激光脉冲的能量时，第一束脉冲的畸变加剧且发生时空的分裂，两束脉冲传播的有效距离有一定的加长。为了充分利用两束脉冲的能量，应进一步考虑脉冲与介质的参数匹配，尤其是脉冲传播的时序。

## 参 考 文 献

- [1] McCall S L, Hahn E L. Self-induced transparency. *Phys. Rev.*, 1969, **183**(2) : 457~ 485
- [2] Slusher R E, Gibbs H M. Self-induced transparency in atomic rubidium. *Phys. Rev. (A)*, 1972, **5**(4) : 1634~ 1959
- [3] Salamo G J, Gibbs H M, Churchill G G. Effects of degeneracy on self-induced transparency. *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **33**(5) : 273~ 276
- [4] Gibbs H M, McCall S L, Salamo G J. Near-ideal self-induced-transparency breakup in highly degenerate systems. *Phys. Rev. (A)*, 1975, **12**(3) : 1032~ 1035
- [5] Grischkowsky D. Self-focusing of light by potassium vapor. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **24**(16) : 866~ 869
- [6] Boshier M G, Sandle W J. Self-focussing in a vapour of two-state atoms. *Opt. Commun.*, 1972, **42**(5) : 371~ 376
- [7] Gibbs H M, B lger B, Mattar F P *et al.*. Coherent on-resonance self-focusing of optical pulses in absorbers. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **37**(26) : 1743~ 1746
- [8] Mattar F P. Transient propagation of optical beams in active media. *Appl. Phys.*, 1978, **17**(1) : 53~ 62
- [9] de Lamare J, Comte M, Kupecek Ph. Spatial distortions of laser pulses in coherent on-resonance propagation: Large-scale self-focusing. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(4) : 3366~ 3378
- [10] 蒋孟衡, 林福成. 强损耗介质中相干光脉冲的传输效应. *物理学报*, 1990, **39**(12) : 1887~ 1892
- [11] 蒋孟衡, 林福成. 两步共振电离中的动力学过程分析. *光学学报*, 1991, **11**(9) : 769~ 774
- [12] 肖 玲, 林福成. 共振原子蒸气中激光脉冲的时空特性. *光学学报*, 1998, **18**(8) : 1001~ 1005
- [13] 孙讷正, 陆祥璇, 李竞生译. 科学和工程中的偏微分方程数值解法. 北京: 煤炭工业出版社, 1989. 163~ 232

## Propagation of Two Laser Pulses in Three-Level Ladder System

Xiao Ling      Lin Fucheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 5 February 1999)

**Abstract** Based on the coupled matrix-density equations and Maxwell equations and considered the transverse effect of the laser pulses, resonant propagation of two laser pulses in three-level ladder system was presented under the cylindrical symmetry. The evolutions of pulses propagating in thick absorbers were studied. The spontaneous relaxation of upper levels is considered in numerical solutions. The calculation results show the evolution of pulse energy and the distribution of ionization particle.

**Key words** ladder system, transverse effect, evolution of pulse energy, ionization particle.