

共振原子蒸气中激光脉冲的时空特性

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 在柱对称条件下, 利用耦合的布洛赫-麦克斯韦(Bloch-Maxwell)方程, 研究了激光脉冲在原子蒸气介质中的共振传播。考察了脉冲在时空中的演化。数值计算结果表明激光脉冲在传播中, 由于自感应透明与光波的衍射效应, 表现出复杂的相干现象。

关键词 柱对称, 自感应透明, 衍射, 时空演化。

1 引 言

激光与原子的相互作用一直是人们感兴趣的课题, 在实际中有广泛的应用。若激光脉冲在原子蒸气中传播很长的距离, 激光与原子的相互作用会在时间和空间上明显地改变激光脉冲的形状、载波频率和传播速度。这种激光脉冲的改变会带来明显的物理效应。所以研究激光与原子蒸气的相互作用是至关重要的。相干光脉冲与物质相互作用会产生一系列的瞬态相干现象, 其中最引人注目的自感应透明效应(self-induced transparency), 是由 McCall 和 Hahn 在 1969 年提出的^[1, 2]。光脉冲在吸收介质相干范围的共振传播(即激光脉宽远小于介质的所有弛豫时间), 脉冲可如孤波般地通过吸收介质^[3, 4]。已观察到脉冲的非线性传播和时间上的脉冲重组, 如脉冲分裂, 子脉冲的延迟以及峰值的放大, 与理论的计算符合得很好^[5]。作者曾经考虑过实际的电离效应对脉冲传播的影响^[6]。然而, 在许多实际的工作中, 激光在光学厚吸收介质中传播, 其横向作用是不容忽视的, 但以前的工作对于脉冲光的横向效应大都没有考虑。

本文利用三维空间的耦合布洛赫-麦克斯韦方程, 建立了时间空间的二能级理论模型。经数值求解, 给出了时间空间上的脉冲演化情况, 并对结果进行了分析。

2 理 论

考虑一个二能级系统, 假定对于光所通过的介质是柱对称的。设入射脉冲光场是中心载波频率为 ω 的波叠加上脉冲包络 $\epsilon(z, r, t)$, 记为

$$E(z, r, t) = \frac{1}{2} \{ \epsilon(z, r, t) \exp [i(kz - \omega t)] + c. c. \} \quad (1)$$

其中 $\epsilon(z, r, t)$ 为复振幅, k 为波矢量的模。那么介质的极化强度为

$$P(z, r, t) = \frac{1}{2} \{q(z, r, t) \exp [i(kz - \omega t)] + c. c. \} \quad (2)$$

式中 $q(z, r, t)$ 为复数, 可写为 $q(z, r, t) = U + iV^{[6]}$, 在以下的数值计算中, 采用 $q(z, r, t)$ 。

相应的布洛赫-麦克斯韦方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} = i(-\Delta\omega q + \frac{\mu}{h}W) - \frac{q}{T_2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = i\frac{\mu}{2h}(\epsilon^*q - \epsilon q^*) - \frac{W - W_0}{T_1} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + 2ik \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = -\omega^2 \mu_0 \int f(\Delta\omega) g(\Delta\omega) d\Delta\omega \quad (5)$$

其中 W 为二能级系统上下能级粒子数之差(乘以 μ), W_0 为撤去外加电场后系统趋于平衡时的上下能级粒子数之差; T_1 是系统的纵向弛豫时间, T_2 是上下能级相干性消失时间; μ 为介质原子的跃迁偶极矩, $\Delta\omega$ 为原子与光频的失谐。

若考虑光与原子蒸气相互作用中的电离效应, 引入一电离速率 Γ 。相应的布洛赫-麦克斯韦方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} = i(-\Delta\omega q + \frac{\mu}{h}W) - \frac{q}{T_2'} \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = i\frac{\mu}{2h}(\epsilon^*q - \epsilon q^*) + \frac{X - W}{T_1'} \quad (7)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{1}{2}(X - W)\Gamma \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + 2ik \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = -\omega^2 \mu_0 \int f(\Delta\omega) g(\Delta\omega) d\Delta\omega \quad (9)$$

(6) 式与(7)式中 $\frac{1}{T_2'} = \frac{\Gamma}{2} + \frac{1}{T_2}$, $\frac{1}{T_1'} = \frac{\Gamma}{2} + \frac{1}{T_1}$, X 为上下能级粒子数之和(乘以 μ)。

3 数值计算与分析

设原子系统与脉冲严格共振, 不考虑多普勒加宽。若脉冲持续时间比上能级到下能级的自发辐射寿命短, 自发辐射可忽略, 即 $T_1, T_2 \rightarrow \infty$ 。模型原子系统气体密度为 $7.0 \times 10^{18}/\text{m}^3$, 其跃迁谱线波长为 $5.896 \times 10^{-7} \text{ m}$, 跃迁偶极矩 $\mu = 1.336 \times 10^{-29} \text{ cm}$ 。脉冲宽度取 7 ns 。设脉冲的光腰位于介质的界面上, 取光腰半径 $r_0 = 0.2 \text{ cm}$ 。时间采用延时坐标 $\tau = t - n \frac{z}{c}$ 。

首先, 不考虑电离效应, 选取激光脉冲面积为 5.6π 。激光脉冲在蒸气中传播, 其光强与横向距离 r 及时间 τ 的三维图示于图 1(a), 对应的等高线图示于图 1(b)。图 1 的等高线与实验^[5]一致。考虑横向距离 r , 可以完整地解释脉冲在时间上的重组。考虑一个初始脉冲, 其轴上的面积介于 5π 与 6π 间, 横截面的能量沿着 r 的方向单调递减。其时空上强度的演化如图 2 所示。初始脉冲(a)的第 1 部分, 相应的起始面积小于 π , 被介质完全吸收。面积介于 π 和 3π 的第 2 部分, 将达到稳定的 2π 脉冲。第 3 部分, 脉冲面积在 3π 与 5π 间, 其面积最终为 4π , 表现为两个 2π 脉冲。第 4 部分的面积大于 5π , 最后形成稳定的三个 2π 子脉冲。初始脉冲(a)逐步演化为(b)的一系列三个月牙形的脉冲^[5], 单个脉冲面积逐渐接近 2π 。(b) 中的 AB 对应

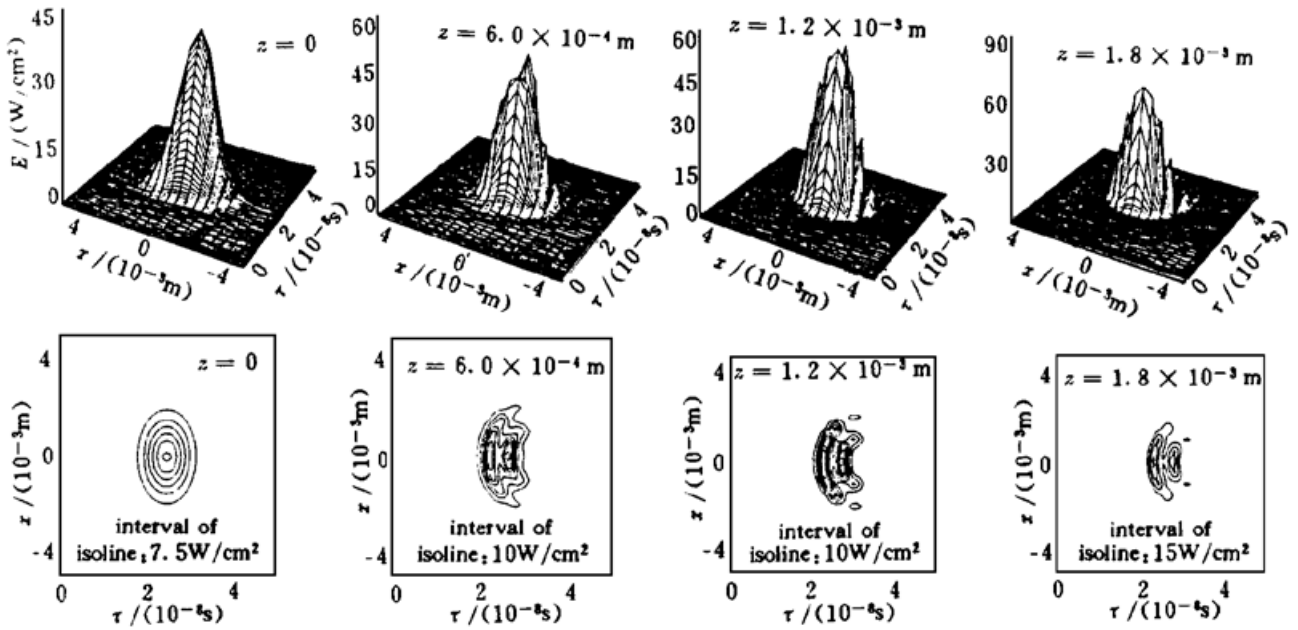


Fig. 1 The spatial-temporal evolution of the on-resonance pulse without Doppler broadening

脉冲轴上的部分, 其光强的演化示于(c)。而沿着 x 方向的各个部分的子脉冲, 各 2π 脉冲都有各自的宽度和相应的延迟时间, 其延迟时间与脉冲宽度有关。较窄、较高的脉冲拉比频率较大, 其时间的延迟较小, 传播在前。随着脉冲的传播, 各 2π 脉冲相互分离, 整个脉冲包络前沿延迟。由(9)式可看出, 由于自感应透明和衍射的相互作用, 径向光强分布发生明显变化。光波的衍射效应不可忽视。最初由于近轴脉冲拉比频率大, 传播速度快。高斯型脉冲演化成月牙型脉冲, 当脉冲外沿自外向内的衍射大于近轴部分自内向外的衍射时, 近轴能量增大。随着脉冲的传播, 月牙型脉冲逐渐拉长, 近轴脉冲前沿向外衍射的损耗增大, 脉冲面积由 6π 降为 4π , 轴上的脉冲能量迅速减小。当脉冲面积变成 4π 而稳定传播时, 朝内的衍射大于向外的衍射, 其能量又逐渐增加。轴上的面积和能量随距离的演化如图 3 所示。当激光脉冲稳定传播时, 由于等相面上各部分的延迟不同, 从而造成近轴部分能量增加, 实验上也观察到类似的结果^[7]。

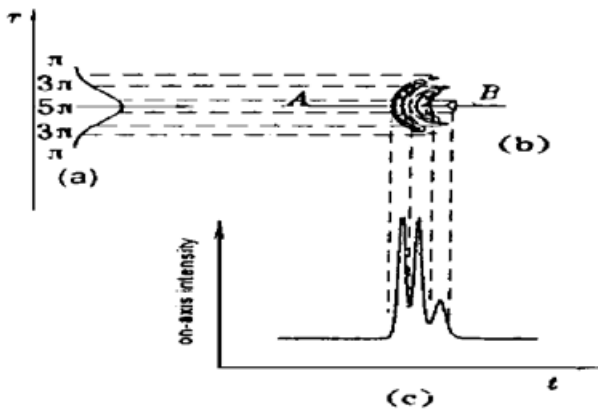


Fig. 2 Demonstration of the on-axis pulse on resonance without Doppler broadening

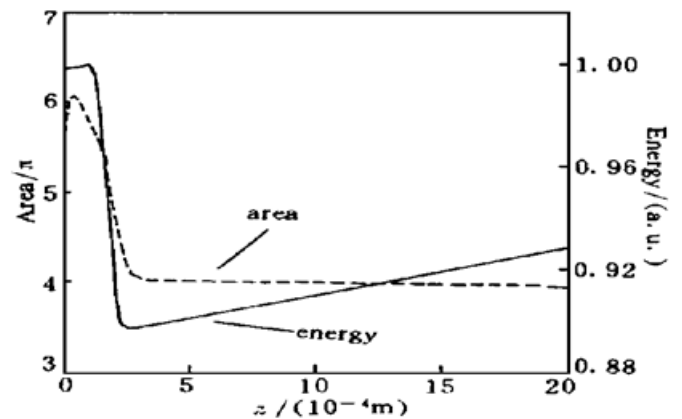


Fig. 3 The area and energy evolution of the on-axis pulse on resonance without Doppler broadening

当考虑电离效应时, 选取脉冲面积为 8.2π , 电离速率 $\Gamma = 1.0 \times 10^8/s$ 。激光脉冲在传播中光强与横向距离 r 及时间 τ 的三维图以及对应的等高线图示于图 4。在有电离的情况下, 脉冲在传播过程中衍射效应退居其次。轴上脉冲的面积及能量随传播距离的演化示于图 5(a)。由于电离效应, 脉冲的能量不断减小。但面积的减少是以 2π 为单位的, 正如一维严格共振电

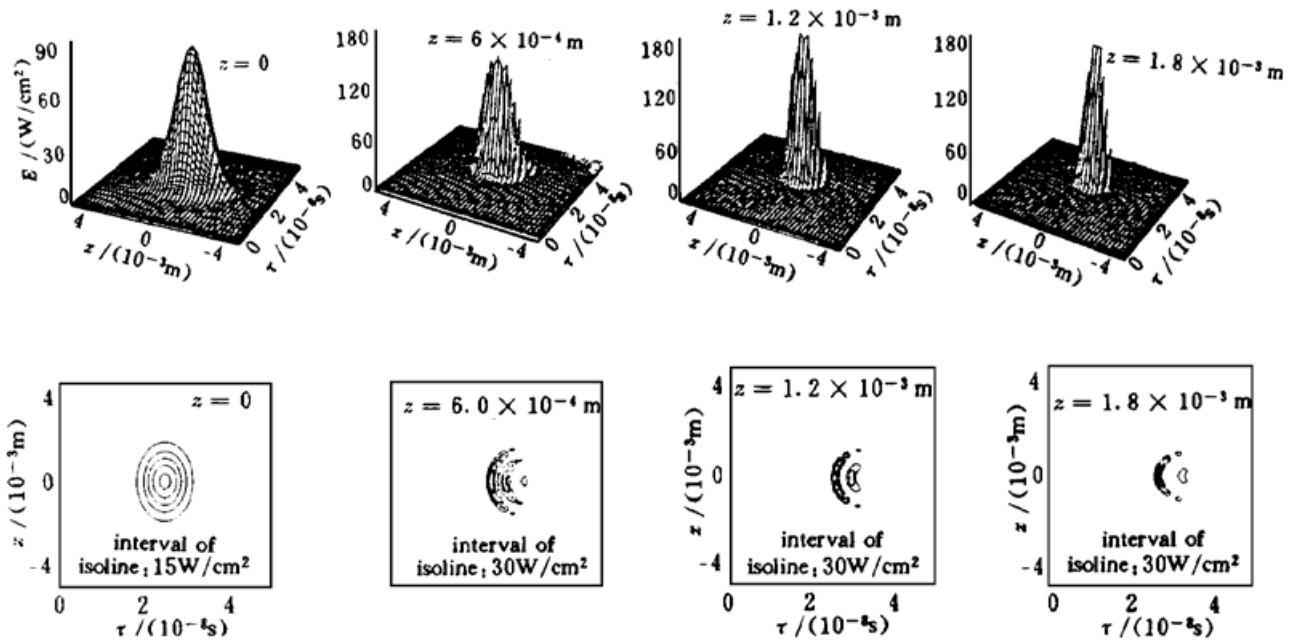


Fig. 4 The spatial-temporal evolution of the on-resonance pulse without Doppler broadening including ionization 离的情况。下能级的粒子数随距离的空间变化如图 5(b) 所示。可看出离轴越远，脉冲的拉比频率逐渐减小，驱动介质粒子的能力也越小，所以粒子数的变化越少，即电离效率越低。由布洛赫方程可知，在严格共振时，每隔一定时间上下能级的粒子数就发生一次完全交换。由于在 r 方向，脉冲的延迟正比于拉比频率的倒数，各 r 位置处于不同的交换时段。各个 r 处的脉冲面积将趋于不同的 2π 整数倍。所以 r 方向的粒子数呈现周期性的振荡。在 z 方向，子脉冲的相对延迟使 z 方向的粒子数呈振荡变化。随着脉冲能量的减小，粒子数的变化减弱。由图 5(b) 可看出这种趋势。



Fig. 5 (a) The area and energy evolution of the on-axis pulse on resonance without Doppler broadening including ionization, (b) The evolution of population on resonance without Doppler broadening including ionization

4 讨 论

考虑三维空间中激光脉冲在介质中的传播，脉冲包络分裂为一系列 2π 孤立峰。整个脉冲包络与各 2π 孤立峰在 r 和 z 方向存在压缩、延迟等特性。脉冲在传播过程中的相干特性是自感应透明和衍射效应综合作用的结果。

若考虑脉冲与原子跃迁间有一失谐量 $\Delta\omega = 0.1 \text{ GHz}$ ，由(3)式可知，失谐使自感应透明效应相对减弱，脉冲的延迟与分裂相应推迟，与严格共振时基本类似，数值计算也有同样结

果。
本文的计算结果对激光分离同位素的工作中选取样品长度、激光脉冲等参数有重要意义。

参 考 文 献

- [1] S. L. McCall, E. L. Hahn, Self-induced transparency. *Phys. Rev. (A)*, 1969, **183**(2) : 457~ 485
- [2] R. E. Slusher, H. M. Gibbs, Self-induced transparency in atomic rubidium. *Phys. Rev. (A)*, 1972, **5**(4) : 1634~ 1659
- [3] A. Zembrod, Th. Gruhl, Self-induced transparency of degenerate transitions with thermally equilibrated levels. *Phys. Rev. Lett.*, 1971, **27**(6) : 287~ 293
- [4] H. M. Gibbs, S. L. McCall, G. J. Salamo, Near-ideal self-induced-transparency breakup in highly degenerate systems. *Phys. Rev. (A)*, 1975, **12**(3) : 1032~ 1035
- [5] Ph. Kupecek, M. Comte, J.-p. Marinier *et al.*, Streak camera analysis of light filaments generated in a resonant atomic vapor. *Opt. Commun.*, 1988, **65**(4) : 306~ 310
- [6] 蒋孟衡, 林福成, 强损耗介质中相干光脉冲的传播效应. *物理学报*, 1990, **39**(12) : 1887~ 1892
- [7] J. De. Lamare, M. Comte, Ph. Kupecek, Spatial distortions of laser pulses in coherent on-resonance propagation: large-scale self-focusing. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(4) : 3366~ 3382

Spatial-Temporal Properties of Laser Pulse Propagating in Resonant Atomic Vapor

Xiao Ling Lin Fucheng

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

(Received 19 August 1997)

Abstract When cylindrical symmetry is assumed, a numerical study of coherent on-resonance propagation of laser pulses in atomic media has been done based on the coupled Bloch-Maxwell equations. The spatial-temporal evolution of the laser pulse was studied in consideration of both the self-induced transparency and diffraction. The numerical results show that the pulses display complicated coherent phenomena.

Key words cylindrical symmetry, self-induced transparency, diffraction, spatial-temporal evolution.