

二能级原子各态几率随脉冲面积变化的 2π 准周期衰减振荡

陈荣清 徐至展 孙 岚 姚关华 张文琦 李 萍

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

二能级原子各态几率随脉冲面积的变化过程将呈现 2π 准周期衰减振荡, 这一结果可为研究任意强激光脉冲作用下的原子行为提供很好的普遍演变图象。

关键词: 二能级原子, 拉比振荡, 2π 准周期衰减振荡。

二能级原子是量子光学中最简单实用的模型之一, 最近发展了很多求解脉冲激光作用下二能级原子问题的解析法和近似法^[1~4]。但是(i)尽管二能级原子很简单, 目前还不能给出任意脉冲形状下的解析解; (ii)近似法还不多; (iii)即便能得到一些解析解或近似解, 也尚无一种直观而普遍的理解方式。

本文重新考察二能级原子在方脉冲作用下的精确解——拉比(Rabi)解, 为理解各态几率随时间的演变提供一些普遍的定量结果, 这些结果适用于所有强激光脉冲作用下的二能级原子。

设二能级原子的两个态分别为基态 $|g\rangle$ 和激发态 $|e\rangle$; 近共振激光场使 $|g\rangle$ 、 $|e\rangle$ 产生强耦合, 失谐量为 Δ ; 处于激发态上的原子存在一种弛豫过程(如光电离、自电离、自发辐射等)而向 $|g\rangle$ 、 $|e\rangle$ 之外的状态跃迁, 其速率为 γ_0 。原子的运动方程为($\hbar=1$, $E_g=0$)

$$\left. \begin{aligned} i\dot{u}_g &= (\Omega/2)u_e, \\ i\dot{u}_e &= \Delta u_e + (\Omega/2)u_g - i\gamma_0 u_e, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 u 为原子的几率振幅, 下标 g 或 e 代表原子状态, Ω 是拉比频率, 正比于光强的平方根, 对于方脉冲激光作用, Ω 仅在激光场与原子的相互作用时间内才不为零, 且保持恒定, 此时方程(1)具有精确解

$$\left. \begin{aligned} u_g(t) &= e^{-\xi t/2} \left[u_g(t=0) \cos \frac{\lambda t}{2} + \frac{\xi u_g(t=0) - i\Omega u_e(t=0)}{\lambda} \sin \frac{\lambda t}{2} \right], \\ \xi &= \gamma_0 + i\Delta, \quad \lambda = (\Omega^2 - \xi^2)^{1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $u(t=0)$ 为 u 的初始值: 在激光场加上 ($t=0$) 之前, 如果原子处于基态, 则有

$$u_g(t=0) = 1, \quad u_e(t=0) = 0。$$

λ 为拉比振荡频率, 它与光强、弛豫速率、失谐量都有关。将(2)式中的下标 g 、 e 互换, 可得到 $u_e(t)$ 的解。

几率是几率振幅的模平方, $P = |u|^2$ 。不难发现, P 随时间的变化是衰减振荡, 又称衰减拉比振荡, 其振荡频率为 λ 。对于方脉冲激光作用, 拉比振荡图象本身就很直观地预言了几率的时间演变过程。对于一般的脉冲激光作用, 光强与时间有关, 因此(2)式不再适用, 即使能提出类似于(2)式的近似表达式, 由于 λ 与时间有关, 人们也难以用一种直观简单的方法来理解几率的演变。

为了更好地研究激光脉冲作用下的原子行为, 最好能找出与时间无关或近似无关的特征, 这些特征最好能适用于任意形状的脉冲场。对于强激光脉冲作用, 的确可找到这样的一些特征。强场条件是指 $\Omega \gg \gamma_0$, $\Omega \gg \Delta$ (或 $\Omega \gg |\xi|$)。在强场条件下 $\lambda \simeq \Omega$, 此时几率 P 随时间的振荡频率近似为拉比频率。定义脉冲面积为

$$A(t) = \int_{-\infty}^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (3)$$

从 P 与 A 的变化关系中可得以下结论: 每当脉冲面积变化 2π 时, 几率就基本上完成了一次衰减振荡。亦即, 各态几率是脉冲面积的衰减准周期函数, 且准周期很接近于 2π , 它基本上与光强、失谐量及弛豫速率无关。图 1 给出了强场下基态几率随脉冲变化的典型图例, 其中虚线对应于方脉冲激光, P_g 直接由(2)式可得; 实线对应于双曲正割型脉冲作用:

$$\Omega(t) = \Omega_0 f(t) = \Omega_0 \operatorname{sech}(\gamma t) \quad (4)$$

脉宽与 γ 成反比。此时方程(1)的解可解析求得, 例如基态几率可用超几何函数表示^[2,3,5]。

无论是图中的实线还是虚线都清楚地显示了几率随面积变化的 2π 准周期衰减振荡。这可理解如下:

对于方脉冲激光作用, 在强场下 $\lambda \simeq \Omega$ 。几率随时间变化的周期约为 $T = (2\pi/\Omega)$, 因此当脉冲面积变化 $\Omega T \simeq 2\pi$ 时, 几率就完成一次振荡。

对于双曲正割型脉冲激光作用, 尽管 $\gamma \sim \gamma_0$ 时二能级原子将呈现很明显的一些短脉冲效应^[3,5], 但除了弱场区域(位于脉冲场 $t = \pm\infty$ 两翼)外, 恒有 $\Omega \gg |\xi|$, $\Omega \gg \dot{f}/f$, 因此当脉冲面积变化 2π 时, f 的变化并不很大。因而激光场强度的变化不很大, 以致在这段时间内我们可把脉冲场用一个方脉冲场来近似。在几率的不同振荡区, 这些方脉冲场强度将有所变化, 但都可相当好地用各振荡区的瞬时 Rabi 频率的平均值来近似。从方脉冲作用结果可知, 几率随脉冲面积变化的准周期约为 2π , 近似地与这些 Rabi 频率的平均值的具体大小无关。

关于 2π 准周期振荡的更进一步讨论及应用将在另文发表。在这里值得强调的是, 各态几率的 2π 准周期振荡存在于所有强激光脉冲场作用的二能级原子中, 且这种振荡并不受具体参数值的影响。因此, 即使在具体计算之前, 只要是在脉冲场的强场区域, 2π 准周期振荡就可提供各态几率的一个相当好的演变图象。最后, 这种 2π 准周期振荡的应用很广。例如, 它可直接用于强场自电离中基态、自电离态的几率演变, 只不过此时的弛豫机制是指自电离态 $|e\rangle$ 到某个连续态的自电离过程^[3,5,6], 而弛豫速率就是自电离速率。

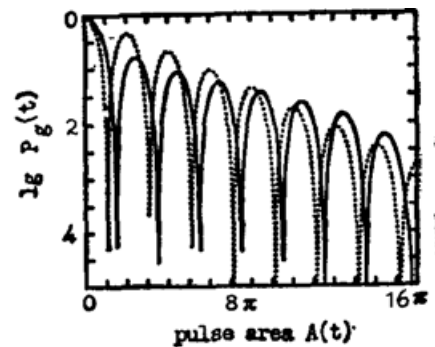


Fig. 1 The population of the ground state as a function of the pulse area.

When the laser pulse is passed, the pulse area is 16π . Dot line: square laser pulse, $\Omega = 5\gamma_0$, $\Delta = 0$; Solid line: hyperbolic secant pulse, $\Omega_0 = 16\gamma_0$, $\Delta = 0$, $\gamma = \gamma_0$

参 考 文 献

- [1] J. Zakrzewski, M. Lewenstein *et al.*; *J. Phys. (B): At Mol. Phys.*, 1985, **18**, No. 23 (Dec), 4631~4637.
[2] C. E. Carrol, F. T. Hioe; *Phys. Rev. (A)*, 1990, **41**, No. 5 (Mar), 2835~2836.
[3] M. Lewenstein, J. Zakrzewski *et al.*; *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1985, **3**, No. 1 (Jan), 22~35.
[4] R. T. Robiscoe; *Phys. Rev. (A)*, 1983, **27**, No. 3 (Mar), 1365~1372.
[5] K. Rzazewski *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1985, **31**, No. 5 (May), 2995~3002.
[6] 陈荣清, 徐至展等;《光学学报》, 1991, **11**, No. 8 (Aug), 173~177. ;

2π quasi-periodical damping oscillation in the area-dependent population of two-level atoms

CHEN RONGQING, XU ZHIHAN, SUN LAN, AND YAO GUANHUA,
ZHANG WENQI AND LI PING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 29 May 1991)

Abstract

A 2π quasi-periodical damping oscillation is shown in the variation in populations of two-level atoms with the time-dependent pulse area, which provides us with a rather good picture of atom behaviors under the influence of arbitrary strong laser pulses.

Key words: two-level atoms, Rabi oscillation, 2π quasi-periodical damping oscillation.