

doi:10.3788/gzxb20134202.0209

三能级原子与少周期脉冲串作用中的 相干布居捕获

蔡勋明^a, 范梦慧^b

(贵州民族大学 a. 计算机与信息工程学院; b. 理学院, 贵阳 550025)

摘 要: 研究了少周期脉冲串作用下三能级原子中的布居转移和相干布居捕获现象. 在非旋波近似的情况下求解了密度矩阵方程. 研究表明在等时间间隔的锁相脉冲作用下, 系统能级的布居逐步转移并积累, 系统基态相干也逐步积累. 在满足脉冲重复频率为基态能级频差的整数分之一倍时, 三能级系统和频率梳中两梳齿频率成分作用形成相干布居捕获现象, 原子暗态布居值达到最大, 介质对脉冲透明. 在适当选取少周期脉冲参量的情况下, 在 0.5 个 ns 的时间内三能级系统相干性演化到最大后到达稳态, 相干布居捕获发生. 与脉宽为 100 个 fs 的多周期脉冲相比, 少周期脉冲串在介质中建立相干布居捕获的时间缩短两个数量级. 由于频率梳中与三能级系统发生作用的梳频成份有相同的频移, 相干布居捕获的条件双光子共振仍然满足. 因而, 当两基态能级频率差较大时, 如果选取少周期脉冲载波频率为系统能级 1 至 2 和 1 至 3 的传输频率之和的一半 $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$, 室温下原子热运动的引起的多普勒频移并不会破坏相干布居捕获.

关键词: 相干布居捕获; 少周期脉冲; 频率梳; 量子相干; 非旋波近似

中图分类号: O431.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0209-5

Coherent Population Trapping of a Three-level Atom Interacting with Few Cycle Pulse Train

CAI Xun-ming^a, FAN Meng-hui^b

(a. College of Computer and Information Engineering; b. College of Science,
Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The population transfer and coherent population trapping of a three-level atom interacting with few cycle pulse train are studied. The density matrix equation in interaction picture is numerical solved without rotating wave approximation. The research indicates that if a three-level atom interacts with a few cycle pulse train, the population transfer of level and the coherence of ground state will be gradual accumulated. When the repetition frequency of pulses is integer points of the ground-state splitting, the three atom interacts with pulse train can be seen as the atom interacts with two tenoning frequency of the frequency comb. So the system will be in the dark state and reach coherent population trapping. If the parameters of few-cycle pulse are appropriately selected, the coherence of three-level system will evolute into stable value in 0.5 nanosecond. The coherent population trapping in the three-level is generated. Comparing with the pulse that the pulse width is 100 femtoseconds, the build-up time of coherent population trapping by few cycle pulse train is shortened two orders of magnitude. When the ground-state splitting is wided enough and the carrier frequency of pulse is $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$, where, are the atomic transition frequency, the doppler frequency shift that is aroused by the movement of atom won't destroy the coherent population trapping of atom. The reason is that all tenoning frequencies of the frequency comb have the same frequency shift, so the condition of coherent population trapping is still meeted.

Key words: Coherent population trapping; Few cycle pulse train; Frequency comb; Quantum coherence; Without rotating wave approximation

基金项目: 贵州民族大学科研基金(No. 校科研 2011(9)号)资助

第一作者: 蔡勋明(1978-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为非线性光学和量子光学. Email: caixm1997@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-08-15; 录用日期: 2012-11-08

0 引言

时域上等时间间隔的激光脉冲串通过位相锁定技术,可在激光脉冲之间形成固定的位相关系.从频域上看,这些激光脉冲的频谱由一系列等距分隔的分立线构成,类似梳齿结构,故称之为频率梳.已有从时域和频域上联合分析锁模激光及脉冲串的报道^[1-2],作者发展了一种称之为直接频率梳谱技术,可同时分析原子动力学演化和在频域上进行谱探测.这种时域和频域上的分析基于脉冲串作用时原子系统中的相干性的积累效应,且要求原子布居弛豫时间远长于脉冲重复周期.通过时域分析方法,两能级和三能级铷原子与飞秒脉冲串的相互作用在理论上和实验上都已得到了分析^[3-4].Hua Tang等研究了二能级原子与超短脉冲串作用中脉冲面积及脉冲数对原子布居演化的影响^[5].文献^[6]分析了三能级 Λ 原子系统与超短脉冲串作用过程中的相干布居捕获现象,指出假如脉冲重复频率为两基态频率之差的分谐波,强度充分的脉冲串将在原子中激发相干,从而介质将变得对激光场透明.Arissian和Diels报道了铷原子中暗态与脉冲重复率之间的关系^[7].当脉冲重复率为基态频率精细劈裂的 $1/57$ 时,可在吸收谱中观察到一条暗线,即无光吸收现象,相干布居捕获发生.Soaes和Araujo理论上研究了满足脉冲重复周期远小于激发态寿命时一个简并的三能级系统与超短脉冲串作用过程中的电磁诱导透明现象^[8].四能级原子与脉冲串作用也已有相关报道,Aumiler等人研究了铷原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ 跃迁四能级系统与脉冲串作用动力学过程^[9],作者分析了各种脉冲串指数下原子布居数和相干性的积累,并进一步分析了该过程中由频率梳激发的相干布居捕获现象.李斌等研究了利用啁啾超短脉冲对二能级体系的调控^[10],张华荣等研究了均匀展宽二能级介质中激光超短脉冲的面积演化规律^[11],王向欣研究了脉冲啁啾对于阿秒脉冲的影响^[12].

以往脉冲与原子相互作用的研究中,脉冲宽度多在100 fs以上,因此相互作用过程中多做了旋波近似^[13-15].随着激光技术的发展少周期乃至亚周期的激光脉冲已在实验室实现^[16-17].尽管迄今还没有直接输出单周期乃至亚周期脉冲的激光器,但利用飞秒脉冲激光器,人们已在多个波段上单周期或者亚周期脉冲的产生和测量^[18].短至飞秒乃至阿秒量级的激光脉冲也已被人们获得,且在能量上峰值能量甚至可以超过 10^{21} W/cm^2 ^[19].在时间如此短和峰值如此高的激光与原子相互作用过程中,旋波近似已不再适用,必须做非旋波近似.本文研究了时

间上等间隔的多个少周期脉冲构成的脉冲串与三能级原子相互作用过程中的相干布居捕获现象,在非旋波近似下研究了脉冲重复率、原子运动引起的多普勒效应对原子布居以及相干布居捕获产生的影响.

1 模型与方程

考虑一个三能级 Λ 型系统与单色脉冲激光场作用,模型如图1.1和2能级之间的传输频率为 ω_1 ,2和3能级之间传输频率为 ω_2 ,1和3之间为禁戒跃迁.单色激光场与原子作用,激光场由一系列时间上等间隔的脉冲构成.

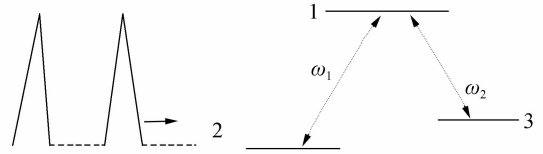


图1 三能级原子与脉冲的作用

Fig. 1 The interaction of three levels atom with pulses

1.1 脉冲激光场表达式

对于少周期脉冲光场,载波包络模型是完全适用的.本文中利用载波包络模型来分析少周期脉冲串激光场.对于由脉冲串构成的激光场,必须考虑两个连续脉冲之间的位相不同.如果以 T_R 作为脉冲重复周期,可以将两相邻脉冲之间的位相差写为 $\Delta\psi = \varphi_R + \omega_L T_R$,其中 φ_R 是激光在谐振腔中往返反射获得的相位, ω_L 为载波频率.故可将脉冲串的电场写为

$$E_T(t) = \sum_{n=0}^{\infty} E(t - nT_R - t_0) \cos(n\Delta\psi) = \sum_{n=0}^{\infty} [E_0 \cdot \delta(t - nT_R - t_0) \cos(n\varphi_R + \omega_L t)] = E_0 \cdot \xi(t) \quad (1)$$

式中, t_0 是第一个脉冲峰值出现时刻.此处忽略 φ_R 带来的影响.本文中使用时使用高斯脉冲包络,即

$$\delta(t - nT_R - t_0) = e^{-(t - nT_R - t_0)^2 / \tau^2} \quad (2)$$

式中, E_0 为电场峰值.此脉冲串在频域上为频率梳,频率梳齿之间间隔为 $1/T_R$,频率梳的中心频率为 ω_L .激光场的第 N 个模频成分可写为

$$\omega_N = \omega_L + 2\pi N/T_R \quad (3)$$

当脉冲串与原子系统作用时,从频域上看可以认为不同频率成份与原子系统的作用.

1.2 系统演化方程

利用密度矩阵演化方程分析原子与光场作用过程中布居数的演化,系统哈密顿量可写为

$$H = -\omega_1 |2\rangle\langle 2| - \omega_2 |3\rangle\langle 3| + \Omega_1 \xi(t) (|1\rangle\langle 2| + |2\rangle\langle 1|) + \Omega_2 \xi(t) (|1\rangle\langle 3| + |3\rangle\langle 1|) \quad (\hbar = 1)$$

在相互作用绘景下,由电场表达式(2)即可得到非旋波近似下系统密度矩阵演化方程

$$\begin{aligned}
\dot{\rho}_{11} &= -i[0.5\Omega_1 \xi(t) \exp(i\omega_1 t) \rho_{12} - \Omega_2 \xi(t)/2 \cdot \\
&\quad \exp(i\omega_2 t) \rho_{23} + 0.5\Omega_1 \xi(t) \exp(-i\omega_1 t) \rho_{21} + \\
&\quad 0.5\Omega_2 \xi(t) \exp(-i\omega_2 t) \rho_{32} - 2(\gamma_1 + \gamma_2) \rho_{11}] \\
\dot{\rho}_{22} &= -i[-0.5\Omega_1 \xi(t) \exp(-i\omega_2 t) \rho_{32} - \Omega_2 \xi(t)/2 \cdot \\
&\quad \exp(i\omega_2 t) \rho_{23}] + 2\gamma_1 \rho_{11} \\
\dot{\rho}_{33} &= -i[-0.5\Omega_1 \xi(t) \exp(-i\omega_1 t) \rho_{21} - \Omega_1 \xi(t)/2 \cdot \\
&\quad \exp(i\omega_1 t) \rho_{12}] + 2\gamma_1 \rho_{11} \\
\dot{\rho}_{12} &= -i[-0.5\Omega_1 \xi(t) \exp(-i\omega_1 t) \rho_{11} + \Omega_1 \xi(t)/2 \cdot \\
&\quad \exp(-i\omega_1 t) \rho_{33} + \Omega_2 \xi(t)/2 \cdot \exp(-i\omega_2 t) \rho_{23}] - \\
&\quad (\gamma_1 + \gamma_2) \rho_{12} \\
\dot{\rho}_{13} &= -i[-0.5\Omega_2 \xi(t) \exp(-i\omega_2 t) \rho_{11} + \Omega_1 \xi(t)/2 \cdot \\
&\quad \exp(-i\omega_1 t) \rho_{32} + \Omega_2 \xi(t)/2 \cdot \exp(-i\omega_2 t) \rho_{22}] - \\
&\quad (\gamma_1 + \gamma_2) \rho_{13} \\
\dot{\rho}_{23} &= -i[-0.5\Omega_1 \xi(t) \exp(-i\omega_1 t) \rho_{31} + \Omega_2 \xi(t)/2 \cdot \\
&\quad \exp(i\omega_2 t) \rho_{12}] \\
\rho_{31} &= \rho_{13}^*, \rho_{21} = \rho_{12}^*, \rho_{32} = \rho_{23}^*
\end{aligned} \quad (4)$$

式中 γ_1, γ_2 为能级 1 到能级 2, 3 的衰减系数, Ω 和 Ω_2 为拉比频率, 其定义式分别为

$$\Omega_1 = -\langle 1 | \mathbf{d} \mathbf{e} | 2 \rangle E_0 / \hbar, \Omega_2 = -\langle 1 | \mathbf{d} \mathbf{e} | 3 \rangle E_0 / \hbar$$

对于微分方程组(4), 求其解析解是困难的, 本文利用预报-修正龙格库塔算法求得其数值解, 分析系统演化性质.

2 原子相干性积累效应和相干布居捕获分析

对三能级 Λ 型原子系统, 1 和 2 能级之间的传输频率为 $\omega_1 = 0.8\pi/\text{fs}$, 2 和 3 之间的传输频率为 $\omega_2 = 0.7\pi/\text{fs}$. 激光频率为 $\omega = 0.75\pi/\text{fs}$. $\Omega_1 = \Omega_2$. 在脉冲串和原子相互作用过程中, 原子相干性会发生积累效应. 通过改变激光脉冲重复率分析相互作用过程中的原子相干性及相干布居捕获现象.

2.1 原子相干性的积累

当原子弛豫时间长于脉冲重复周期时, 原子布居数在两个相邻脉冲间不能完全弛豫. 因此脉冲串对原子的激发将表现为相干性和不同能态之间布居转移的积累, 当脉冲重复率为基态两能级频率差的整数分之一倍时, 这时不能把原子看成和单个脉冲的频谱作用, 而应认为和整个脉冲串的频率梳谱作用. 当 Λ 型激发系统中两个跃迁通道和频率梳谱中两个梳齿频率形成双光子共振时, 如频率梳中这两个相应梳齿成分所对应的强度近似相等即可在原子系统中激发起相干布居捕获现象, 而如果强度一强一弱, 则会形成电磁诱导透明现象. 假设初始原子布居在能态 2, f_{23} 表示两基态能级 2, 3 频率差. 图 2 展示了当脉冲重复频率为基态频率之差的 1/57 时原子相干性的积累.

原子相干性以密度矩阵非对角元的实部 $\text{Re}(\rho_{23})$ 表征. 从图中可以看出随着光脉冲数的增加, 原子的相干性逐步积累, 经过 1×10^{-9} s 后, 已有 877 个脉冲和原子发生相互作用, 原子相干性绝对值已稳定在 0.499 9. 图 3 展示了能级上布居随时间的演化, 可见随脉冲的作用, 能态 3 上布居值稳定在 0.492, 能态 2 上布居值稳定在 0.508. 此处基态能级 2, 3 上的布居接近均等分布. 图 2 和图 3 中, 脉冲重复频率 $f_{\text{rep}} = f_{23}/57$, 脉冲宽度 $\tau = 5 \times 10^{-15}$ s, 峰值拉比频率 $\Omega_1 = \Omega_2 = 0.56 \times 10^{14}$ Hz.

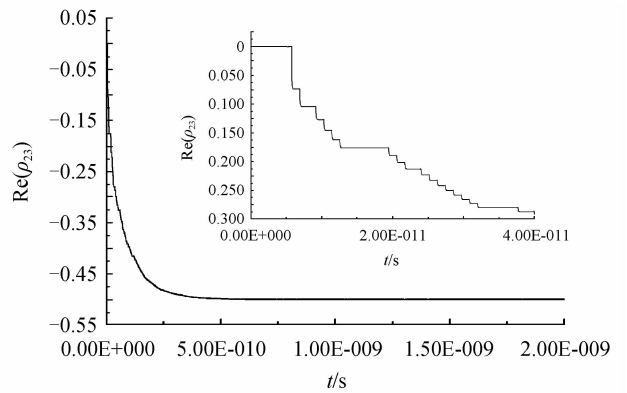


图 2 原子相干性演化(内置图表示 4×10^{-11} s 内原子相干性演化)

Fig. 2 The evolution of atomic coherence vs. time(the evolution of atomic coherence in 4×10^{-11} s)

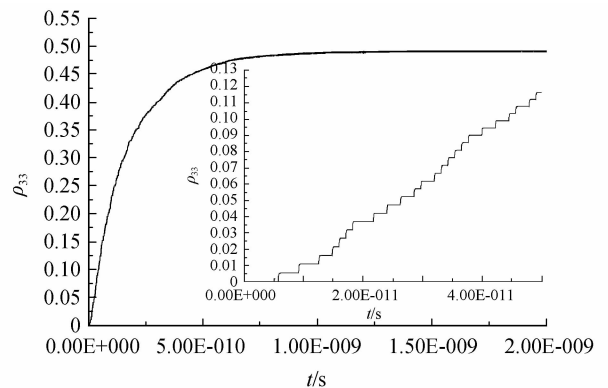


图 3 原子能级 3 上布居随时间的演化(内置图表示 5×10^{-11} s 内原子布居演化)

Fig. 3 The population of level 3 vs. time(the inset is the evolution of atomic population in 5×10^{-11} s)

从图 3 中可知, 随着脉冲的作用, 能级 3 上的布居逐步积累, 经过 1×10^{-9} s 后趋向稳定. 这一过程可以理解为频率梳中两梳齿频率成分和三能级系统中 1-2 和 1-3 跃迁耦合, 作用稳定后在三能级系统中形成暗态. 由于两梳齿频率成分强度并非完全等同, 故能级 2, 3 上布居也非完全相等.

2.2 相干布居捕获

当时域上多个等时相隔脉冲和原子作用时, 从频域上看为频率梳中不同频率成分和原子能级耦合, 而脉冲重复频率为三能级中两基态能级频率差的整数

分之一时,即满足电磁诱导透明或者相干布居捕获发生的条件.本文中分析少周期脉冲串与三能级原子相互作用,少周期脉冲持续时间在飞秒量级.在如此短的时间尺度下虚光子效应对原子演化有重要影响,已不能忽略.此处分析在非旋波近似下脉冲串激发的三能级原子中的相干布居捕获现象.单个脉冲的脉宽为 5 fs,峰值拉比频率为 5.6×10^{13} Hz.图 4 展示了当脉冲重复频率从 $f_{23}/49.9$ 变化至 $f_{23}/59.1$ 时,激发态布居改变.

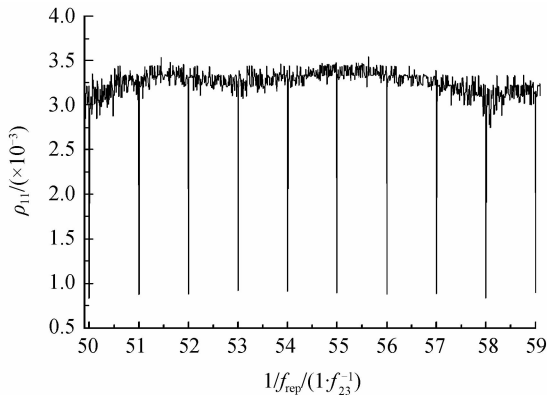


图 4 激发态布居 ρ_{11} 随脉冲重复频率变化
Fig. 4 The population of excited state ρ_{11} vs. the repetition frequency of pulses

从图 4 中可知当脉冲重复频率为基态能级频率之差整数分之一倍时,在原子介质中形成了相干布居捕获现象.由于此处使用少周期脉冲构成的脉冲串,从原子初态到相干布居捕获暗态形成时间非常短,在 0.5 ns 的时间内即在原子介质内形成暗态.与通常使用的脉宽 100 fs 以上脉冲构成的脉冲串相比^[9,20],少周期脉冲串在本文所给出三能级原子介质模型中建立相干布居捕获暗态的时间缩短两个数量级以上,这对于超快反应过程研究、超快微型光学器件研制是有意义的.需要指出的是虽然做了旋波近似,方程组(4)中仍含有含时项,其稳定解将是随时间振荡的解,图 4 所得结果为方程组(4)稳定解对时间做平均后结果,这与实际探测相符,实际探测响应为一段时间平均后结果.

如果定义介质中的暗态如: $|D\rangle = (|2\rangle - |3\rangle)/\sqrt{2}$,则系统中暗态布居可表示为: $\rho_D = (\rho_{22} + \rho_{33})/2 - \text{Re}(\rho_{23})$.暗态布居数随脉冲重复频率的演化表示了原子基态相干性随重复频率的变化.设原子初始布居在能级 2,则图 5 表示了速度为零的原子群暗态布居随脉冲重复频率变化图.

从图 5 中得知,当脉冲重复频率为基态能级频率差整数分之一倍时,基态相干性达到最大值,系统处于暗态的布居值最大.

室温下原子均有一定的速度分布,考虑原子运动

的多普勒效应,相对于静止原子,运动原子和光作用时,光频将有频移,设原子的速度为 v ,则光频应替换为 $\omega = \omega_0(1 + v/c)$.

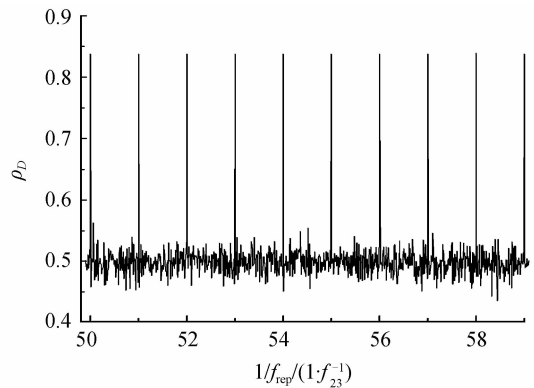


图 5 暗态布居 ρ_D 随脉冲重复频率的变化
Fig. 5 The population of dark state ρ_D vs. the repetition frequency of pulses

图 6 中,脉冲重复频率 $f_{rep} = f_{23}/85$,脉冲宽度 $\tau = 5 \times 10^{-15}$ s,峰值拉比频率 $\Omega_1 = \Omega_2 = 0.56 \times 10^{14}$ Hz.由图可知,当脉冲重复频率为基态能级频率差的整数分之一倍时,考虑室温下的原子速度从 -500 m/s 变化至 500 m/s,原子激发态布居不随原子的速度改变而改变,此时原子两基态布居率在接近均匀分布,原子仍处于暗态.其原因可以解释为:本文中脉冲载波频率介于两传输频率 ω_1 和 ω_2 之间,由频率梳中某一梳齿频率计算公式 $\omega_n = \omega_L \pm 2\pi n f_{rep}$, ω_L 脉冲载波频率即频率梳中心频率,当频率梳与三能级原子作用发生相干布居捕获时,两梳齿频率成分有相同的失谐量,满足双光子共振,考虑多普勒效应后,频率梳中心频率和各梳齿频率均发生相同的频移,仍满足双光子共振.即满足相干布居捕获发生的条件.可以选取速度为 500 m/s 的原子群,来分析激发态布居随脉冲重复频率的变化.

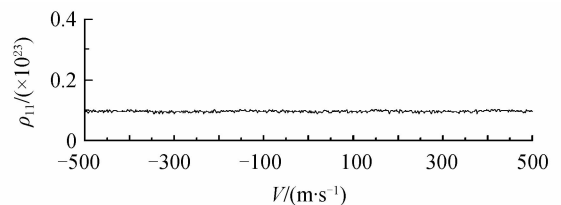


图 6 激发态布居随原子速度的变化
Fig. 6 The population of excited state vs. atomic velocity

从图 7 中可知速度为 500 m/s 原子群仍然满足脉冲串作用下相干布居捕获发生的条件.这一点可解释为:1)考虑原子速度引起的多普勒效应后,脉冲串的频率梳谱与原子作用的双光子谐振仍满足;2)本文模型中两基态能级频率差较大,考虑原子多普勒效应后,多普勒频移远远小于频率梳中两相邻梳齿频率成分频距,故室温下多普勒频移不会引起本文模型中相干布居捕获的改变.

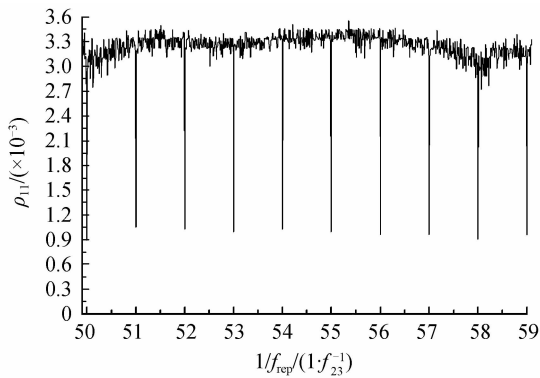


图7 速度为 500 m/s 的原子群激发态布居 ρ_{11} 随脉冲重复频率的变化

Fig. 7 The population of excited state ρ_{11} of atom group that the velocity is 500 m/s vs. the repetition frequency of pulses

3 结论

研究了少周期锁相脉冲串与三能级 Λ 型原子作用中的相干布居捕获现象. 在非旋波近似的情况下数值求解了脉冲串与三能级原子相互作用的密度矩阵方程组. 选取脉冲载波频率位于三能级原子两跃迁通道跃迁频率 ω_1 和 ω_2 之间即 $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$, 脉冲的作用下, 原子能级布居逐步转移并积累, 原子基态相干性也同步积累. 在本文中所取参量的情况下, 在 0.5 ns 时间内, 原子布居转移及基态相干性达到稳态值, 脉冲重复频率为基态能级频率差的整数分之一倍时发生相干布居捕获. 与通常使用脉宽 100 fs 以上脉冲相比, 少周期脉冲串建立相干布居捕获的时间缩短两个数量级. 分析了少周期脉冲串与原子作用过程中暗态. 在考虑原子运动引起多普勒频移的情况下, 分析了原子速度对相干布居捕获的影响. 在考虑多普勒频移后, 频率梳中各梳齿频率成份均发生频移, 双光子共振条件仍满足. 本文中两基态能级频率差较大, 室温下多普勒频移远小于频率梳中两梳齿间距, 原子的运动不会对原子相干布居捕获产生影响.

参考文献

[1] MARIAN A, STOWE M C, LAWALL J R, *et al.* United time-frequency spectroscopy for dynamics and global structure[J]. *Science*, 2004, **306**(5704): 2063-2068.

[2] AUMILER D, BAN T, VUJIĆ I, N, *et al.* Characterization of an optical frequency comb using modified direct frequency comb spectroscopy[J]. *Applied Physics B* 2009, **97**(3): 553-560.

[3] FELINTO D, BOSCO C A C, ACIOLI L H, *et al.* Coherent accumulation in two-level atoms excited by a train of ultrashort pulses[J]. *Optics Communications*, 2003, **215**(1): 69-73.

[4] FELINTO D, ACIOLI L H, VIANNA S S. Accumulative effects in the coherence of three-level atoms excited by femtosecond-laser frequency combs[J]. *Physics Review A*. 2004, **70**(4): 043403-1-043404-4.

[5] TANG Hua, NAKAJIMA T. Effects of the pulse area and pulse number on the population dynamics of atoms interacting with a train of ultrashort pulses[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(18): 4671-4675.

[6] SAUTENKOV V A, ROSTOVTSEV Y V, YE C Y. Electromagnetically induced transparency in rubidium vapor prepared by a comb of short optical pulses[J]. *Physics Review A*, 2005, **71**(6): 063804-1~063804-4.

[7] ARISSIAN L, DIELS J C. Repetition rate spectroscopy of the dark line resonance in rubidium[J]. *Optics Communications*, 2006, **264**(1): 169-173.

[8] SOARES A A, DDRAUJO L E E. Coherent accumulation of excitation in the electromagnetically induced transparency of an ultrashort pulse train[J]. *Physics Review A*, 2007, **76**(4): 043818-1~043818-6.

[9] AUMILER D, BAN T, G PICHLER. Time dynamics of a multilevel system excited by a train of ultrashort pulses[J]. *Physics Review A*, 2009, **79**(6): 0634031-0634039.

[10] LI Bin, LI Cheng, YU Xiang-yang. Modulation of chirped ultrashort pulse on two-level atom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1752-1756.
李斌, 李成, 余向阳. 啁啾超短激光脉冲对二能级体系特性的调控[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1752-1756.

[11] ZHANG Hua-rong, JIANG Yue, LI Cheng, *et al.* Evolution rule of ultra-short laser pulse area in homogeneously broadened medium[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1608-1612.
张华荣, 蒋月, 李成, 等. 均匀展宽介质中激光超短脉冲面积的演化规律[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1608-1612

[12] WANG Xiang-Xin, WANG Cheng, LI Shao-Hui, *et al.* Dependence of attosecond pulses on the chirp of the excitation pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 641-643.
王向欣, 王成, 李邵辉, 等. 脉冲啁啾对于阿秒脉冲的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 641-643.

[13] ZHANG Hai-xia, YANG Xing-yu. Impact of ultra-short pulse propagation with third-order nonlinear dispersion in negative refractive media[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3133-3137.
张海霞, 杨性愉. 负折射介质中三阶非线性色散项对超短脉冲传输的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3133-3137.

[14] ZHOU Xiao-hong, WANG Ze-yong, WANG Li, *et al.* Propagation properties of high power ultrashort pulse in the gain medium[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1528-1532.
周小红, 王泽勇, 王黎, 等. 高功率超短脉冲在增益介质中的传输特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1528-1532.

[15] CHENG Guang-hua, LIU Qing, YANG Ling-zheng, *et al.* The nonlinear absorption and configuration of refractive index changes of fused silica induced by femtosecond laser pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1281-1285.
程光华, 刘青, 杨玲珍, 等. 飞秒激光脉冲诱导透明介质的非线性吸收和折射率改变轮廓研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1281-1285.

[16] SHVERDIN M Y, WALKER D R, YAVUZ D D, *et al.* Generation of a single-cycle optical pulse[J]. *Physics Review Letters*, 2005, **94**(3): 033904-1-033904-4.

[17] CHEN Wei-Jan, HSIEH Zhi-Ming, HUANG Shu-Wei, *et al.* Sub-single-cycle optical pulse train with constant carrier envelope phase[J]. *Physics Review Letters*, 2008, **100**(16): 1639061-1639064.

[18] SANSONE G, DENEDETTI E, CALEGARI F, *et al.* Solated Single-Cycle Attosecond Pulses[J]. *Science*, 2006, **314**(5798): 443-446.

[19] BAHK S W, ROUSSEAU P, PLANCHON T A, *et al.* Generation and characterization of the highest laser intensities (10^{22} W/cm²) [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(24): 2837-2839.

[20] AUMILER D. Coherent population trapping in 87Rb atoms induced by the optical frequency comb excitation[J]. *Physics Review A*, 2010, **82**(5): 0554021-0554024.