

引用格式：许朋. 镱原子光频标中泵浦光特性的研究[J]. 时间频率学报, 2021, 44(2): 85-91.

镱原子光频标中泵浦光特性的研究

许朋

(皖北卫生职业学院, 宿州 234000)

摘要: 镱原子光频标中泵浦光参数的优化可以提高钟频率稳定度性能。通过分析镱原子能级分布的特点, 建立了能级跃迁速率方程。采用数值计算方法求解速率方程, 获得了泵浦时间与 649 nm、770 nm、1 388 nm 泵浦光的光强和失谐的关系。比较了两种泵浦方法的效果, 分析了泵浦时间的改变对钟频率稳定度性能的影响。理论计算的结果为实验确定泵浦光的光强、泵浦时间提供了重要的参考。

关键词: 镱原子光频标; 速率方程; 泵浦光

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-02-0085-07

The research of the characteristics of pump light in ytterbium atomic optical frequency standard

XU Peng

(North Anhui Health Vocational College, Suzhou 234000, China)

Abstract: The optimization of the pump light parameters in the ytterbium atomic optical frequency standard can improve the clock frequency stability performance. By analyzing the characteristics of the energy level distribution of ytterbium atom, the energy level transition rate equation was established. The numerical calculation method was used to solve the rate equation, and the relationship between the pumping time and the intensity and detuning of the pump light at 649 nm, 770nm and 1 388 nm was obtained. The effects of the two pumping methods were compared, and the effect of changes in pumping time on the performance of clock frequency stability was analyzed. The results from our theoretical calculation provide an important reference for the experiment to determine the pump light intensity and pumping time.

Key words: ytterbium atomic optical frequency standard; rate equation; pump light

0 引言

随着原子冷却和囚禁、飞秒光梳技术的发展, 光频标取得了飞速进展。我国开展了光频标的研究并取得重要的成果。离子光频标方面, 中国科学院武汉物理与数学研究所实现了不确定度和稳定度(20 000 s)均达到 10^{-17} 的 Ca^+ 光频标^[1]。中性原子光频标方面, 中国计量科学研究院实现了 ^{87}Sr 原子光频标的闭环锁定和不确定度评定^[2], 中国科学院国家授时中心实现了 ^{87}Sr 原子光频标的闭环锁定^[3], 华东师范大学和

中国科学院武汉物理与数学研究所先后实现了 ^{171}Yb 原子光频标的闭环锁定^[4-5]。国际上, A. D. Ludlow^[6] 小组实现了长时间的 ^{171}Yb 光频标的测量, 得到钟跃迁绝对频率为 518 295 836 590 863.71(11) Hz。日本的研究小组^[7]最近完成了 ^{171}Yb 光晶格钟的不确定评估, 总的分数不确定度为 3.6×10^{-16} 。

镱原子光频标是一种中性原子光频标, 具有高频率稳定度和不确定度潜力。对于 ^{171}Yb 原子频标, 钟跃迁 $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ 被激发后, 一部分原子处于基态 1S_0 , 其他部分处于激发态 3P_0 。此时利用 $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ 跃迁的 399 nm 激光照射冷原子团, 处于基态 1S_0 的原子被清除出光晶格, 得到基态原子数为 N_1 。接下来有两种方案可以把处于激发态 3P_0 的原子泵浦回基态 1S_0 。一是利用 649 nm 和 770 nm 两束激光共同泵浦。二是用一束 1 388 nm 激光^[8-9]泵浦。最后利用 399 nm 激光探测由激发态回到基态的原子数 N_2 。通过计算 $N_2/(N_1 + N_2)$, 能够得到归一化的原子跃迁几率。可见泵浦光在确定 ^{171}Yb 原子频标的过程中起到比较重要的作用。本文对泵浦时间与泵浦光一些参数的关系进行了较为深入的研究, 具体内容为: 方案一采用 649 nm 和 770 nm 激光作为泵浦光时, 泵浦时间随它们一些参数的变化。方案二采用 1 388 nm 激光作为泵浦光时, 泵浦时间随其一些参数的变化。最后是讨论和总结。

1 泵浦方案一分析

经过 399 nm、556 nm 激光的两级磁光阱冷却后, 冷镱原子被囚禁在 759 nm 的光晶格中, 利用超窄线宽 578 nm 激光激发 $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ 的跃迁。没有被激发的原子利用 399 nm 激光进行探测。被激发到 3P_0 能级的原子, 通过 649 nm 和 770 nm 泵浦光的共同作用经 3P_1 能级返回 1S_0 能级。图 1 给出了镱原子的能级图^[10-11]。

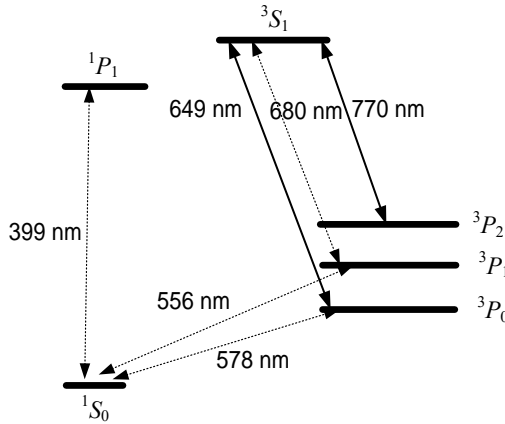


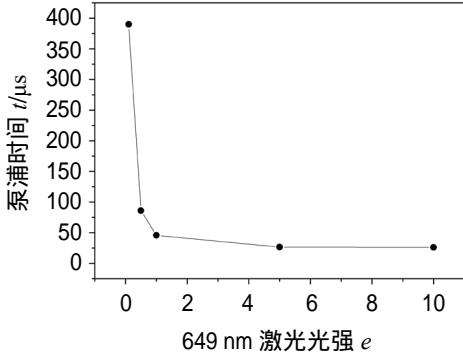
图 1 镱原子的能级图

649 nm 和 770 nm 泵浦光共同作用下, 处于不同能级的原子数的变化方程如下^[12-14]

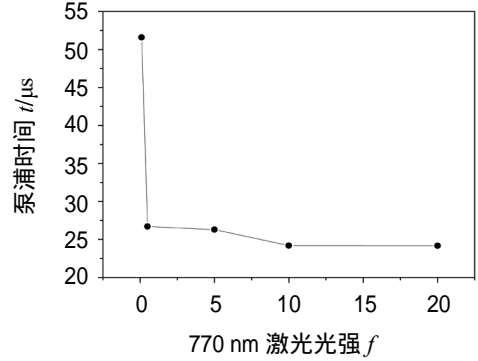
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\frac{p^3}{8} \frac{e}{g^2 + (p/2)^2} (x-z) + pz \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{r^3}{8} \frac{f}{h^2 + (r/2)^2} (y-z) + rz \\ \frac{dz}{dt} = \frac{p^3}{8} \frac{e}{g^2 + (p/2)^2} (x-z) + \frac{r^3}{8} \frac{f}{h^2 + (r/2)^2} (y-z) - z(p+r+q), \\ \frac{da}{dt} = zq - ka \\ \frac{dn}{dt} = ka \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, x, y, z, a, n 分别表示 $^3P_0, ^3P_2, ^3S_1, ^3P_1, ^1S_0$ 能级的原子数。 p, q, r, k 分别表示 $^3S_1 \rightarrow ^3P_0, ^3S_1 \rightarrow ^3P_1, ^3S_1 \rightarrow ^3P_2, ^3P_1 \rightarrow ^1S_0$ 的自发辐射率。 e, f 分别表示 649 nm、770 nm 激光的光强(以相应跃迁的饱和光强为单位)。 g, h 分别表示 649 nm 激光频率相对 $^3S_1 \rightarrow ^3P_0$ 跃迁频率、770 nm 激光频率相对 $^3S_1 \rightarrow ^3P_2$ 跃迁频率的失谐。式(1)采用 Mathematica 软件里的 DSolve 函数求解。

首先, 研究 649 nm、770 nm 泵浦光光强变化对泵浦处于 3P_0 能级原子的影响, 如图 2 所示。



(a) 泵浦时间随 649 nm 激光光强的变化



(b) 泵浦时间随 770 nm 激光光强的变化

图 2 1S_0 能级的原子数达到 10 000 时需要的泵浦时间 t 随激光光强 e 和 f 的变化

图 2 (a) 给出条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个, $f = 1, g = -10 \text{ MHz}, h = -10 \text{ MHz}$ 下, 时间 t 随 649 nm 激光光强 e 变化的曲线。从图 2 (a) 可知, 光强 e 从 0.1 增加到 5 时, t 从 $390 \mu\text{s}$ 迅速降到 $26.5 \mu\text{s}$ 。当 $5 < e < 10$ 时, 泵浦时间的变化小于 $1 \mu\text{s}$ 。因此, 光强 e 可以取 5 附近的值。图 2 (b) 给出条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个, $e = 5, g = -10 \text{ MHz}, h = -10 \text{ MHz}$ 下, 时间 t 随 770 nm 激光光强 f 变化的曲线。从图 2 (b) 可知, 光强 f 从 0.1 增加到 10 时, t 从 $51.6 \mu\text{s}$ 降到 $24.2 \mu\text{s}$ 。 $10 < f < 20$ 时, 泵浦时间的变化小于 $1 \mu\text{s}$ 。需要注意的是图 2 (b) 曲线变化的条件之一是 649 nm 激光光强选取了图 2 (a) 中较好的参数 $e = 5$ 。计算结果根据 1S_0 能级原子数精确达到 10 000 时确定, 不断调整参数, 得到的时间误差不超过 $1 \mu\text{s}$ 。图 2 (a) 和 (b) 表明, 随着 649 nm、770 nm 光强的增加, 泵浦时间都逐渐减小。649 nm 激光光强的变化对泵浦时间的影响相对较大。为了更清晰地判断 649 nm 和 770 nm 激光光强在较大范围变化时, 泵浦时间的变化, 给出条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个, $g = -10 \text{ MHz}, h = -10 \text{ MHz}$ 下, 649 nm 激光光强 e 分别取 0.1、0.5、1、5、10, 770 nm 激光光强 f 分别取 0.1、1、5、10 时, 泵浦时间 t 变化的图形, 如图 3 所示。

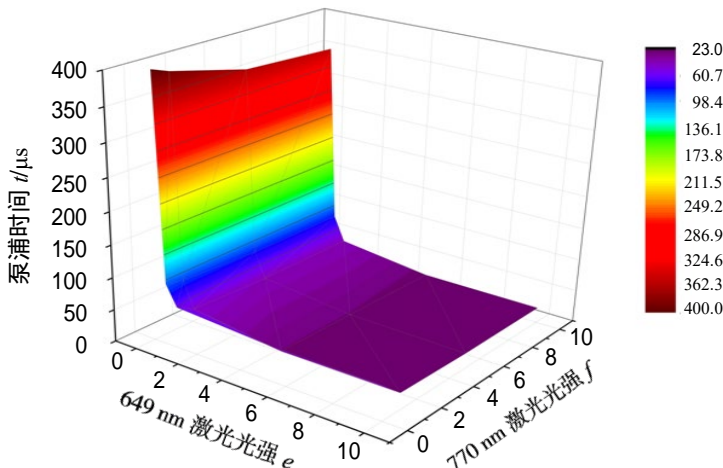
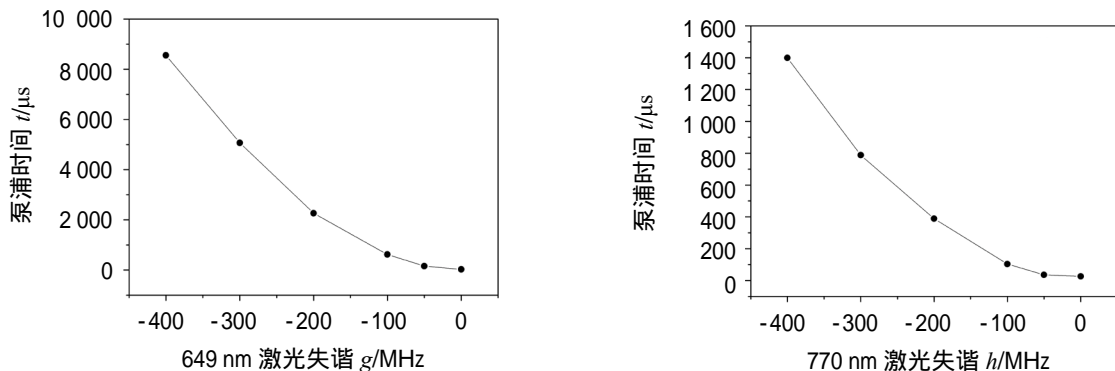


图 3 1S_0 能级的原子数达到 10 000 时需要的泵浦时间 t 随 649 nm 和 770 nm 激光光强的变化

从图 3 可知,在 649 nm 激光光强 $e > 5$ 且 770 nm 激光光强 $f > 1$ 区域,泵浦时间不超过 30 μs 。综合计算的结果,一定条件下,我们取 649 nm 激光光强 $e = 5$, 770 nm 激光光强 $f = 1$ 。

其次,研究 649 nm、770 nm 泵浦光失谐的变化对泵浦处于 3P_0 能级原子的影响,如图 4 所示。



(a) 泵浦时间随 649 nm 激光失谐的变化

(b) 泵浦时间随 770 nm 激光失谐的变化

图 4 1S_0 能级的原子数达到 10 000 时需要的泵浦时间 t 随激光失谐 g 和 h 的变化

图 4 (a) 给出条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个, $e = 5$, $f = 1$, $h = -10$ MHz 下,时间 t 随 649 nm 激光失谐 g 变化的曲线。从图 4 (a) 可知,649 nm 激光失谐 g 从 0 MHz 增加到 -400 MHz 时, t 从 26.1 μs 增加到 8.5 ms。因此,649 nm 激光的失谐不能太大,频率漂移要尽量小,否则需要较长的时间才能完成原子的泵浦。图 4 (b) 给出条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个, $e = 5$, $f = 1$, $g = -10$ MHz 下,时间 t 随 770 nm 激光失谐 h 变化的曲线。从图 4 (b) 可知,770 nm 激光失谐 h 从 0 MHz 增加到 -400 MHz 时, t 从 26.4 μs 增加到 1.4 ms。770 nm 激光的失谐在较大范围内变化时,2 ms 左右的泵浦时间就可以完成泵浦。比较图 4 (a) 和 (b),可以发现随着 649 nm、770 nm 激光失谐的增加,泵浦时间都逐渐增大,一般需要几毫秒量级的泵浦时间。

为了更清晰地分析 649 nm 和 770 nm 激光失谐在较大范围变化时,泵浦时间的变化,给出条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个, $e = 5$, $f = 1$ 下,两束激光失谐分别取 0、-50、-100、-200、-300 和 -400 MHz 时,泵浦时间 t 变化的图形,如图 5 所示。

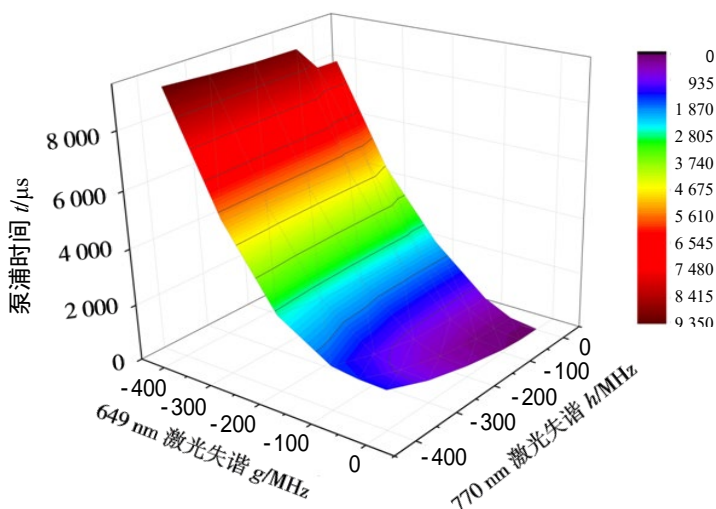


图 5 1S_0 能级的原子数达到 10 000 时需要的泵浦时间 t 随 649 nm 和 770 nm 激光失谐的变化

从图 5 可知,649 nm 激光和 770 nm 激光的失谐都在 -400 MHz 以内时,泵浦时间不超过 10 ms。一

般情况下，649 nm 激光的失谐在 -200 MHz 以内且 770 nm 激光的失谐在 -400 MHz 以内时，泵浦时间不超过 3 ms。随着 649 nm 激光失谐的增大，泵浦时间显著的变大。

最后分析一下 649 nm 和 770 nm 激光频率漂移引起的泵浦时间的变化 dt/MHz 。假定 649 nm 和 770 nm 激光都偏离其对应跃迁的共振频率 200 MHz，在这一点 dt/MHz 的数值为：649 nm 为 $21.9 \mu\text{s}/\text{MHz}$ ，770 nm 为 $0.1 \mu\text{s}/\text{MHz}$ 。可知，泵浦时间随 649 nm 激光频率漂移变化较大。

2 泵浦方案二分析

第二种方案是采用 ${}^3P_0 \rightarrow {}^3D_1$ 跃迁的 1 388 nm 激光作为泵浦光，把处于 3P_0 能级的原子泵浦回基态 1S_0 ，如图 6 所示。

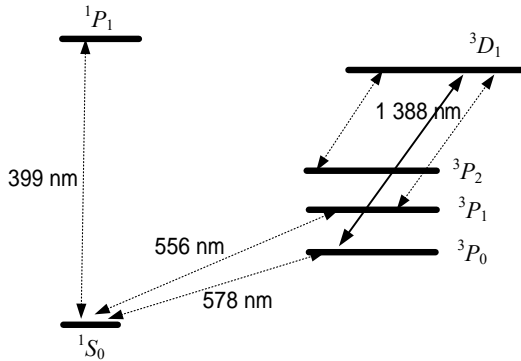


图 6 1 388 nm 激光作为泵浦光时，镱原子的能级图

利用类似方程 (1) 的方法可以研究 1 388 nm 泵浦光的光强 s 和失谐 ω 变化对泵浦时间的影响。需要注意的是 3D_1 能级的原子有一部分自发辐射到 3P_2 能级而损失掉，建立方程的时候考虑了损失的部分。首先，条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个， $\omega = -10 \text{ MHz}$ 下，时间 t 随光强 s (以 ${}^3D_1 \rightarrow {}^3P_0$ 跃迁的饱和光强为单位) 变化的曲线，如图 7 所示。

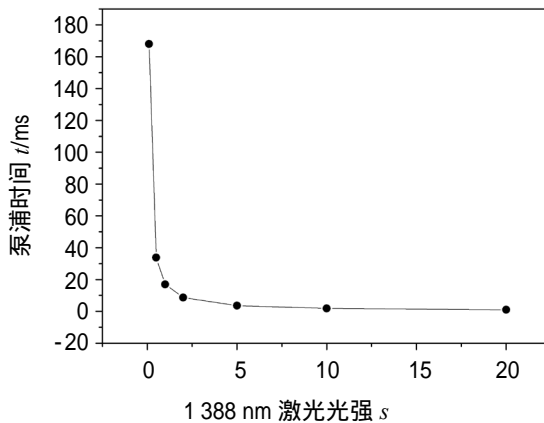


图 7 1S_0 能级的原子数达到稳态时需要的泵浦时间 t 随 1 388 nm 激光光强 s 的变化

从图 7 可知， s 从 0.1 增加到 20 时， t 从 168 ms 迅速降到 1 ms。因此，光强 s 可以取 20 左右的值，以便快速完成原子的泵浦。其次，条件 3P_0 能级的原子数为 10 000 个，光强 $s = 20$ 下，时间 t 随失谐 ω 变化的曲线，如图 8 所示。

从图 8 可知，1 388 nm 激光失谐 ω 从 0 MHz 增加到 -50 MHz 时， t 从 0.2 ms 增加到 21 ms。因此，1 388 nm 激光的失谐不能较大，频率漂移要比较小，否则需要很长的时间才能完成原子的泵浦。

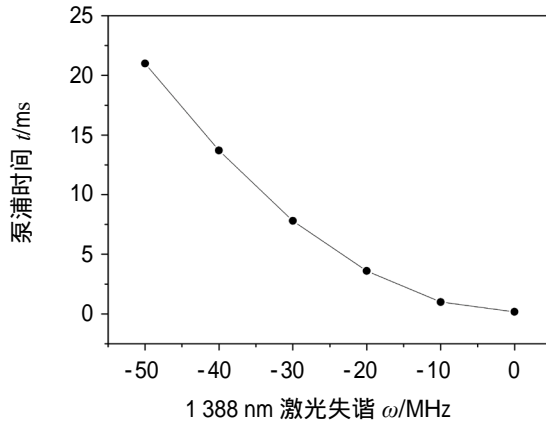


图 8 1S_0 能级的原子数达到稳态时需要的泵浦时间 t 随 1388 nm 激光失谐 ω 的变化

3 讨论

两种泵浦方案相比较,采用 1388 nm 激光泵浦时,需要的相对光强要大些,失谐量要尽量小,频率漂移要非常小。不论采用 649 nm 和 770 nm 激光还是采用 1388 nm 激光作为泵浦光,都需要通过荧光谱线或其他方法确定其相应跃迁的共振频率以及这些激光频率与共振频率的偏差量(失谐)为多少。因为泵浦时间与激光偏离跃迁共振频率的大小有关,偏离越大需要的泵浦时间越长。文献[9]给出了 1388 nm 激光的共振频率。649 nm 和 770 nm 激光的共振频率暂时未见文献报道。采用 1388 nm 激光泵浦时,假定 3P_0 能级的原子数为 10000 个,实际回到 1S_0 能级的原子数为 7692。这样,在计算 578 nm 激光产生的跃迁几率的时候要考虑损失的原子带来的影响。方案一中计算泵浦时间 t 的时候,依据是 1S_0 能级的原子数精确达到 10000 的时间。计算结果具有一定的误差,例如在条件 $e=5, f=1, g=-400$ MHz, $h=-400$ MHz 下,需要 9.3 ms 才能完成 10000 个原子的泵浦。如果泵浦时间为 1.8 ms,只有 9900 个原子回到基态 1S_0 。泵浦时间相差 7.5 ms,回到基态的原子数只变化了 100。从中看到泵浦时间的较大变化对回到基态 1S_0 的原子数的影响(进一步对应 578 nm 激光跃迁几率的计算)可能不是很明显,需要根据计算和实验进一步确定。方案一中,分开考虑了光强和失谐的变化,例如考虑 649 nm 激光和 770 nm 激光失谐变化的时候,假定它们的光强固定不变。如果失谐变化的同时,光强也发生变化,可能会带来新的影响,需要根据实验条件进一步研究。量子投影噪声对镱原子光钟频率稳定度的影响用下式来表示^[15]

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi Q \sqrt{N_{\text{at}}}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}, \quad (2)$$

式(2)中, τ 为总的测量时间, T_c 为原子钟循环运行的钟周期, N_{at} 是作为量子参考的粒子总数,品质因子 $Q = \nu_0 / \Delta\nu$, ν_0 为量子跃迁的中心频率, $\Delta\nu$ 为钟跃迁谱线的线宽。根据文献[5]的数据估算量子投影噪声。 $\nu_0 = 518\,295\,836\,590\,863$ Hz, $\Delta\nu = 18$ Hz, $N_{\text{at}} = 30\,000$, $T_c = 3.6$ s, 1388 nm 激光泵浦时间为 5 ms。代入数据得到 $\sigma_y(\tau) = 1.227 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$ 。运用本文的理论,选择适当的参数,1388 nm 激光泵浦时间可以选择为 1 ms,这样钟循环时间减小为 $3.6 - 0.016 = 3.584$ s。重新计算得 $\sigma_y(\tau) = 1.224 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$,噪声降低了 0.2%。

4 总结

本文对 ^{171}Yb 原子频标中采用 649 nm 和 770 nm 或者 1388 nm 激光作为泵浦光的特性进行了较为深

入的分析。研究了 1S_0 能级的原子数达到一定数量时需要的泵浦时间随泵浦光的光强、失谐的变化。运用此处的理论计算泵浦时间的时候需要综合考虑原子数、光强、失谐、频率漂移等因素。理论计算可以为中性原子频标实验中泵浦光的光强、频率稳定性和泵浦时间等参数的优化提供一定的参考，也可以推广到其他需要泵浦光作用的实验。

参考文献：

- [1] HUANG Y, GUAN H, LIU P, et al. Frequency comparison of two ^{40}Ca optical clocks with an uncertainty at the 10^{-17} level[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(1): 013001.
- [2] LIN Yi-Ge, WANG Qiang, LI Ye, et al. First evaluation and frequency measurement of the strontium optical lattice clock at NIM[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(9): 090601
- [3] WANG Ye-Bing, YIN Mo-Juan, REN Jie, et al. Strontium optical lattice clock at the National Time Service Center[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2): 208-213.
- [4] ZHANG Xiao-hang, ZHOU Min, CHEN Ning, et al. Study on the clock-transition spectrum of cold ^{171}Yb ytterbium atoms[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12: 025501.
- [5] LIU Hui, ZHANG Xi, JIANG Kun-Liang, et al. Realization of closed-loop operation of optical lattice clock based on ^{171}Yb [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(2): 020601.
- [6] MCGREW W F, ZHANG X, LEOPARDI H, et al. Towards the optical second: verifying optical clocks at the SI limit[J]. *Optica*, 2019, 6(4): 448-454.
- [7] KOBAYASHI T, AKAMATSU D, HISAI Y, et al. Uncertainty evaluation of an ^{171}Yb optical lattice clock at NMIJ[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2018, 65(12): 2449.
- [8] NEMITZ N, OHKUBO T, TAKAMOTO M, et al. Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 s averaging time[J]. *arXiv[physics.atom-ph]*, 2016: 1601.04582.
- [9] 张梦娇. 一维光晶格中镱原子光频钟跃迁谱的研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2016.
- [10] LEE J, LEE J H, NOH J, et al. Core-shell magneto-optical trap for alkaline-earth-metal-like atoms[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(5): 053405.
- [11] 梁洁, 贺凌翔. 镱原子激光冷却的动力学分析[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2009, 55(6): 665-668.
- [12] CHO J W, LEE H, LEE S, et al. Optical repumping of triplet P-states enhances magneto-optical trapping of ytterbium atoms[J]. *arXiv[physics.atom-ph]*, 2011: 1111.6225.
- [13] HU F, NOSSKE I, COUTURIER L, et al. Analyzing a single-laser repumping scheme for a strontium magneto-optical trap[J]. *arXiv[physics.atom-ph]*, 2018: 1812.01258.
- [14] DAMMALAPATI U, NORRIS I, BURROWS C, et al. Spectroscopy and isotope shifts of the $4s3d\ ^1D_2-4s5p\ ^1P_1$ repumping transition in magneto-optically trapped calcium atoms[J]. *Physical Review A*, 2010, 81: 023424.
- [15] 林弋戈, 方占军. 镱原子光晶格钟[J]. *物理学报*, 2018, 67(16): 160601.