

引用格式:汪中,陈景标. 基于相干滤波和相干布居数囚禁原理的激光原子钟[J]. 时间频率学报,2022,45(2):124-128.

基于相干滤波和相干布居数囚禁原理的 激光原子钟

汪中, 陈景标

(北京大学 信息科学技术学院电子学系,北京 100871)

摘要:激光原子钟基于相干布居数囚禁(CPT)和激光器模式锁定的基本原理,其谐振腔内仅有两个模式可以振荡,而且这一设计可以使两个纵模振荡频率与特定工作原子的跃迁频率相等,且相互锁定。而且由于激光谐振腔内插入的干涉滤光单元和 CPT 单元的双重作用,使两个模式的频率间隔精确等于工作原子的基态超精细结构跃迁频率,并且在谐振腔模式中具有最高增益。通过对激光器腔长、增益,以及腔内插入单元的稳定性控制,以此方法建成的激光器将有两个稳定的纵模输出,而两纵模之间的拍频将精确等于 CPT 系统工作原子的基态超精细能级的跃迁频率。直接检测两个纵模的拍频,就可以获得高稳定度的标准频率输出。而且由于其模式锁定过程是一个物理的自动牵引锁定过程,不再像一般原子钟那样依赖于锁定电路和对原子跃迁信号的探测和识别。因此有望获得更高的稳定度。其标准频率的信号强度,信噪比也会大大高于以往方法产生的原子钟输出信号。

关键词:原子钟;相干滤波;相干布居数囚禁;干涉滤光片;锁模

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2022-02-0124-05

Laser atomic clock based on coherent filtering and coherent population trapping

WANG Zhong, CHEN Jing-biao

(Department of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Our laser atomic clock based on the basic principle of CPT and laser mode locking, in the cavity, there are only two modes in the resonator that can oscillate, and this unique design can make the oscillation frequencies of the two longitudinal modes equal to the transition frequencies of specific working atoms and locked to each other, and their frequency interval equal to the transition frequency of the ground state hyperfine structure of the atom. The reason is that, in the laser atomic clock the dual functions of interference filter and CPT system in the resonator make the two oscillate modes having the highest gain when their frequency interval exactly equal to the ground state hyperfine transition frequency of the atom. By stabilizing the cavity length, gain and insertion system, the laser built by this method will have two stable longitudinal mode outputs, and the frequency difference between the two longitudinal modes will be exactly equal to the transition frequency of the ground state hyperfine levels of the working atoms of the CPT systems in the cavity. By directly detecting the beat frequency of two longitudinal modes, the standard

frequency output with high stability can be obtained. Because the mode locking process is a physical automatic traction locking process, it no longer relies on the locking circuit and the detection and recognition of the atomic transition signal as the general atomic clock does. Therefore, it is expected to obtain higher stability. The signal intensity and signal-to-noise ratio of the standard frequency output are also much higher than those of the atomic clock output signal produced by the previous methods.

Key words: atomic clock; coherent filtering; coherent population trapping (CPT); interference filter; mode locking

0 引言

原子钟是提供时间频率标准的精密仪器设备,并正在科研领域、国防建设,乃至人民日常生活中起到越来越重要的作用。一般原子钟的工作原理^[1]是将一个微波频率或光波频率与探测到的工作原子的一个稳定的能级跃迁频率锁定,使得这个微波频率或光频率与作为基准的原子能级跃迁频率相等,并将基准频率转换为适当的微波频率作为原子钟输出的标准频率。这种情况下,原子钟的重要指标,即输出的标准频率的稳定性不仅依赖于工作原子本身对应的跃迁能级频率间隔的稳定性和跃迁谱线宽度,而且很大程度上依赖于对跃迁谱线峰值的探测以及伺服电路的锁定精度和噪声水平。

而我们所建议的方案是针对原子钟标准频率的提取和锁定机制所提出的,其目的是避免输出标准频率的稳定性受到锁定电路和探测方法的影响。具体做法是:基于相干布居数囚禁^[2](CPT)效应对激光器增益的调制现象,利用增益峰值将激光模式自动锁定,使其频率间隔稳定的等于工作原子基态超精细结构的跃迁频率。本文的思路是通过上述原理,用增益牵引的物理机制将激光输出模式自动锁定在相干布居数囚禁现象产生的两个透过峰峰顶,使输出激光的两个模式的频率差严格等于工作原子的基态两个超精细结构能级的跃迁频率,此时两个激光纵模的拍频即为原子钟的输出标准频率。本文将基于以上原理提出一种输出信号的信噪比高、对伺服电路系统的依赖性低、稳定性高的基于物理机制自动精确锁定的激光原子钟方案。

1 基本原理

首先根据相干布居数囚禁效应^[2-4],在具有图 1 所示 Λ 能级结构的碱金属原子中。典型地以铯原子和铷原子为例,如图 1 所示其基态超精细结构两能级之间的跃迁频率 $\Delta\nu$ 一般被用作原子钟的基准频率。 ω_1 和 ω_2 分别为两个超精细结构基态到激发态的跃迁频率,对应铯原子的 D1 线,波长为 894 nm,而对应铷原子的 D1 线波长为 795 nm。以铷原子钟为例,当两个激励光场的圆频率严格等于 ω_1 和 ω_2 时,基态的两个超精细能级上的粒子将不会被激发到激发态能级,即所谓相干布居数囚禁现象。此时粒子将被囚禁在基态的两个超精细结构能级上,通过原子气室的光子将不再被吸收,透过光出现一个线宽极窄的透过峰,荧光则出现一条暗线,即 CPT 谱线。根据 CPT 基本原理,对激发光场的要求是,两激励光场必须是相同方向旋转的圆偏振相干光场,两光场的激光振荡频率差严格等于原子基态两个能级超精细结构能级的跃迁频率 $\Delta\nu$ 。根据这一原理基本要求,如果两个圆偏振激光场通过 ⁸⁷Rb 原子气室,当两光场相干锁定,且激光频率差严格等于 $\Delta\nu$ 时,两光场将有最大透过率。

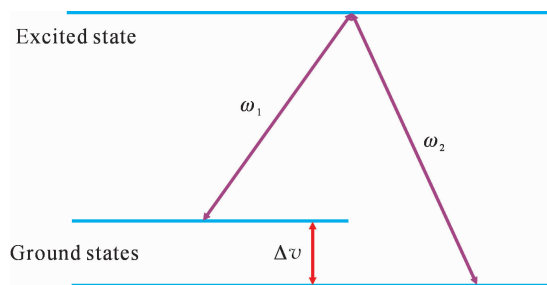


图 1 原子的 Λ 三能级结构

根据对 CPT 原理的理论研究^[2,4]可以得出, CPT 透过峰的宽度可由式(1)决定:

$$\Delta\nu_c = \left(\frac{1}{\pi}\right)\left(\gamma_2 + \frac{\omega_R^2}{\Gamma^*}\right), \quad (1)$$

式(1)中: γ_2 为基态能级的衰减率, ω_R^2 为拉比频率的平方,与光场强度相关; Γ^* 为激发态到基态的自发辐射几率,其谱线为洛伦兹线型。由于原子基态超精细能级寿命长, γ_2 实际很小,因此 $\Delta\nu_c$ 线宽仅与自然增宽和激励光场强度相关而不受多普勒增宽影响。因此谱线将非常窄,可小于 50 Hz^[5]。本文所提出激光原子钟正是利用这一 CPT 效应,使激光谐振腔内符合 CPT 效应的两个激光模式具有更低的损耗,从而只有两个模式实现振荡。而且由于 CPT 原理对激励光的要求,两激光场必须相干,如果两个光场为激光器的两个纵模,则两个纵模将处于模式锁定状态^[6]。而且根据激光锁模原理,两纵模光场相位锁定且增益相关,光场强度也趋于平衡,因而更加有利于 CPT 效应的建立和增强。

2 系统设计

本文所提出的激光原子钟系统具体设计如图 2 所示,其基本结构可以视为在一个外腔半导体激光器的谐振腔中插入相干滤波和 CPT 两个单元,以实现振荡模式的控制和锁定,使谐振腔仅允许两个激光模式振荡,而两个振荡模式的频率差严格等于所选择的工作原子的基态超精细能级跃迁频率,从而实现激光原子钟。

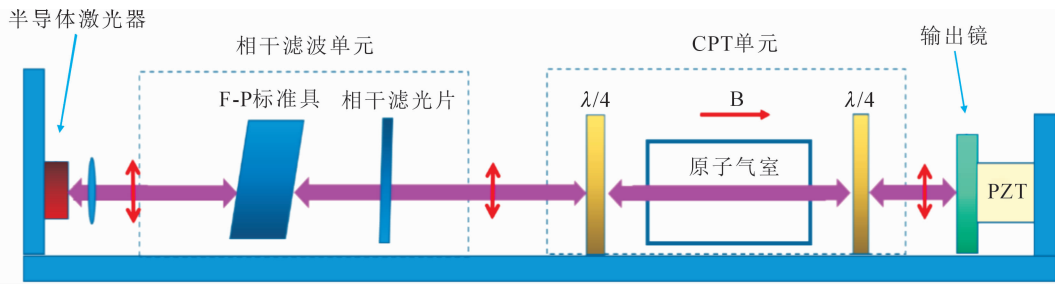
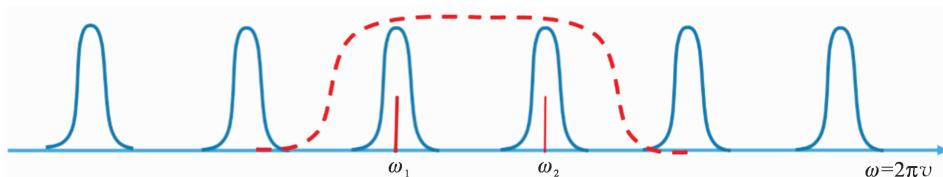


图 2 激光原子钟谐振腔装置图

图 2 中半导体激光器作为激光原子钟的增益介质,它的输出光首先进入相干滤波单元,其作用是选择可透射光谱。其透射光谱则应与 CPT 工作单元所选择的工作原子的激励光谱相对应。仍然以 ^{87}Rb 原子为例,其中半导体激光器波长选择为 795 nm,增益谱范围要求覆盖 CPT 两个激励光场的光谱范围。由于半导体激光管的出射面镀增透膜,出射光为覆盖两激励光场 ω_1 和 ω_2 的增益谱的荧光场。而干涉滤光单元有两个光学元件,首先是一个 F-P 标准具,它的作用形成一个梳状透射谱,要求是梳齿间隔为 ^{87}Rb 原子基态超精细能级跃迁频率。由于 F-P 腔频率间隔 $\Delta\nu_{\text{FP}}$ 由下式决定:

$$\Delta\nu_{\text{FP}} = \frac{c}{2nl}, \quad (2)$$

式(2)中: c 为光速, l 是 F-P 腔的腔长, n 为折射率。将 ^{87}Rb 基态超精细能级跃迁频率代入,令 $\nu_{\text{FP}} = 6.8 \text{ GHz}$,可以直接计算出 F-P 腔长。如果令 $n = 1$, l 约为 2.2 cm。通过调整标准具倾角和控温可以将透过谱的两个梳齿对准激励光频率 ω_1 和 ω_2 。在标准具后放置干涉滤光片,其透过光谱视为仅允许对应 ω_1 和 ω_2 的梳齿范围的光场透过,如图 3 所示,其余梳齿对应的光场则被滤除。



注:图中梳齿状实线为 F-P 标准具透过谱,虚线为干涉滤光片透过谱。联合形成干涉滤光单元透过谱,只允许对准 ω_1 和 ω_2 的两个梳齿对应的光场透过

图 3 干涉滤光单元透过光谱示意图

光场经过相干滤波单元后,透过光场的光谱为图 3 中的对应 ω_1 和 ω_2 的两个梳齿形状。而后进入图 2 所示的 CPT 单元。半导体激光器输出一般为线偏振光,进入 CPT 单元后,首先进入第一个 $\lambda/4$ 波片,将与激励光场相对应的两个频率的线偏振光转化为圆偏振光。与 ω_1 和 ω_2 相对应的两个圆偏振光场与原子气室中的工作原子相作用,原子将吸收激励光跃迁到激发态,因此会形成两个对应于 ω_1 和 ω_2 ,线宽取决于多普勒效应的吸收峰(见图 4)。当两光场中心频率差等于工作原子基态超精细能级跃迁频率,并符合相干条件时,产生 CPT 效应。此时,原子被囚禁在基态,不再吸收光场能量,对应吸收峰峰顶处将如图 4 所示出现两个相当于 CPT 谐振线宽的透射峰。

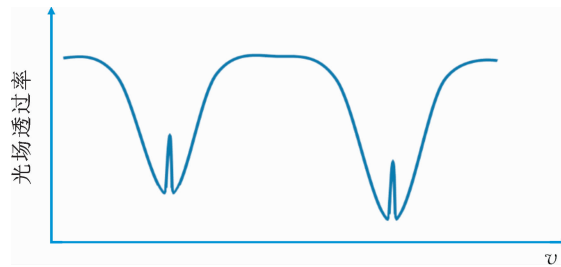


图 4 CPT 单元透过光谱

显然,图 3 中的两个透射峰,与图 4 中两个吸收峰位置相同。透过峰和吸收峰相抵消,两个激励光场在单程透过相干滤波和 CPT 两个单元后,透过谱线如图 5 所示,为两个线宽相当于 CPT 谱线宽度^[5,7]的透过峰。其宽度由式(1)决定。

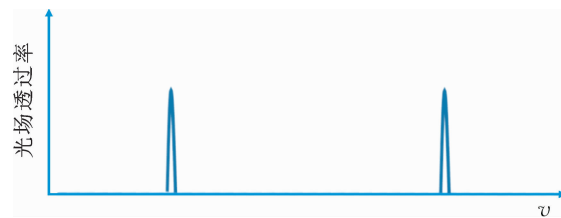
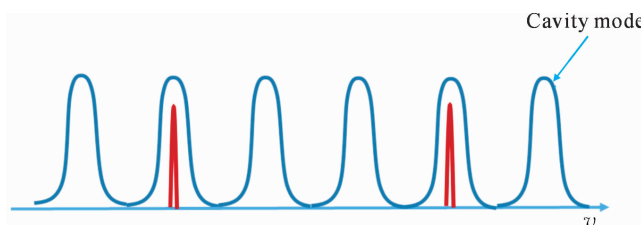


图 5 经过相干滤波和 CPT 单元后的透过光谱

透过光场经过第二个 $\lambda/4$ 波片后转换成为与入射光偏振方向相同的线偏振光,然后到达输出镜。输出镜的反射率应适当降低,与半导体激光器远端面反射镜形成一个所谓坏腔^[8],其目的是降低谐振腔的 Q 值或细度^[5],使激光谐振腔模式的线宽大于 CPT 透过峰的宽度,其相互关系如图 6 所示。这一设计目的是减小激光谐振腔对纵模的频率牵引效应,使谐振腔对激光原子钟的频率稳定性的影响尽量小。



注:谐振腔纵模线宽大于 CPT 透过峰宽度,以减小谐振腔对频率稳定性的影响

图 6 激光原子钟谐振腔的坏腔纵模与 CPT 透过峰光谱示意图

光场经输出镜反射沿原路径返回,依次反向通过 CPT 单元和相干滤波单元。由于坏腔透过率高,光强比正向通过时大幅度降低,因此两方向光场相位匹配问题可以忽略。其后光场再次通过第一个 $\lambda/4$ 波片,转换成与入射光偏振方向相同的线偏振光,反向通过干涉滤波单元后经透镜耦合回到半导体激光器被放大,并反射完成腔内的一次循环。在此基础上,将腔长调整,使谐振腔频率间隔 $\Delta\nu_L = C/2nL$ (L 为谐振腔腔长)与原子基态超精细能级跃迁频率 $\Delta\nu$ 的关系符合式(3)的关系:

$$\Delta\nu = n\Delta\nu_L, \quad (3)$$

式(3)中: n 为正整数。并通过输出镜连接的PZT对腔长进行精确调整,使其符合图6所示的谐振腔模式与透过峰关系。此时,通过谐振腔的正反馈,以及CPT要求的光场相干性要求;同时调整半导体激光器的增益,使两对应纵模增益达到阈值,而其他模式增益小于阈值,谐振腔内将建立起两个相位锁定的纵模振荡。而纵模间隔刚好等于CPT单元气室工作原子 ^{87}Rb 基态超精细能级跃迁频率。而且由于增益竞争,纵模振荡频率将趋向于振荡在图5所示CPT的峰顶处,实现基于激光增益竞争的模式频率自动锁定。这一过程将使输出两纵模光场频率间隔精确等于 ^{87}Rb 基态超精细能级跃迁频率,也正是原子钟要提取的基准频率。而这两个模式的相干和锁定会使两者的强度和增益相关联,进而使得两个激光纵模强度趋于一致。这一现象会更有利于CPT效应的建立,提高两激光纵模的频率稳定性。在激光原子钟谐振腔内稳定的双纵模激光场建立后,测量两个输出模式激光场的拍频,即可获得激光原子钟的基准频率。

这一基准频率的获得与传统方法的不同主要是在于:提取过程和原理上不再依赖于对原子跃迁频率的探测精度和微波信号与探测信号的锁定电路的稳定性、可靠性和锁定精度。两个激光纵模直接由物理过程锁定。只要将激光谐振腔参数控制在一定范围内,并且激光谐振腔和F-P腔的细度与CPT透过峰相比足够大,既可以保证两激光模式振荡在正确频率点,而其拍频将精确等于原子基态两超精细能级的跃迁频率。

3 总结

本文提出了一种在激光谐振腔内插入相干滤波和CPT单元,以获取原子钟基准频率的激光原子钟方案。显然,本设计方案中的干涉滤光单元也可以用法拉第原子滤光器代替,而且透过光谱将更精准,关于这一点作者会在另外文章中论述。而本文方案应该是一种实现较为方便,成本较低的实用型方案。它通过在激光谐振腔内插入相干滤波单元和CPT单元的方式,限制腔内可振荡激光纵模。使腔内仅两个符合激励CPT效应要求的纵模光场达到振荡阈值,从而只有这个两个纵模光场可以在腔内形成激光振荡。其余腔模则由于达不到阈值而不能振荡。而由于CPT效应的要求,使这两个纵模相互锁定,且由于增益牵引效应,其中心频率被自动稳定在频率间隔精确等于工作原子基态超精细能级的跃迁频率的两个频率点。这是激光原子钟方案与传统原子钟以及其他双频激光建议^[9]的不同之处,为原子钟基准频率的提取开辟了一条新的道路。同时,由于激光原子钟输出是两个激光纵模,其强度、信噪比将大大好于传统方式检测的信号,并且其稳定性和可靠性不再依赖于探测和锁定电路,直接由物理过程决定,因此很可能具有更好的稳定性指标。

参考文献:

- [1] 王义道. 量子频标原理[M]. 北京:科学出版社,1968.
- [2] VANIER J. Atomic clocks based on coherent population trapping:a review[J]. Applied Physics B,2005(81):421-442.
- [3] ARIMONDO E,DRRIOLS G. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping[J]. Lettere Al Nuovo Cimento,1976,17(10):333-338.
- [4] VANIER J,GODONE A,LEVI F. Coherent population trapping in cesium:dark lines and coherent microwave emission[J]. Physical Review A,1998,58(3):2345-2358.
- [5] VANIER J,LEVINE M W,JANSSEN D,et al. Contrast and linewidth of the coherent population trapping transmission hyperfine resonance line in ^{87}Rb :Effect of optical pumping[J]. Physical Review A,2003,67(6):065801.
- [6] 周炳琨,陈侗嵘. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [7] LEVI F,GODONE A,VANIER J,et al. Line-shape of dark line and maser emission profile in CPT[J]. The European Physical Journal D-Atomic,Molecular,Optical and Plasma Physics,2000(12):53-59.
- [8] CHEN J B. Active optical clock[J]. Chinese Science Bulletin,2009,54(3):348-352.
- [9] CAMARGO F A,BARRIENTOS J,BAILI G,et al. Coherent dual-frequency emission of a vertical external-cavity semiconductor laser at the cesium[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2012,24(14):1218-1220.