

激光与光电子学进展

低振动敏感性的法布里-珀罗腔设计

商俊娟^{1,3,4,5}, 竹显伟¹, 张浩^{1,3}, 张燕燕¹, 周培林^{1,3,4,5}, 胡建东^{1,3}, 张梦娇^{2*}

¹河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002;

²河南农业大学理学院, 河南 郑州 450002;

³河南省农业激光技术国际联合实验室, 河南 郑州 450002;

⁴郑州市农业仿生材料与低碳技术重点实验室, 河南 郑州 450002;

⁵郑州市农业装备智能设计与绿色制造重点实验室, 河南 郑州 450002

摘要 铝离子光钟跃迁谱线的自然线宽为 8 mHz, 因此, 需要用线宽为 1 Hz 左右的激光探测光钟跃迁谱线。半导体激光器的线宽为 500 kHz, 长期漂移量为 90 MHz/h, 为了满足铝离子光谱探测的要求, 将激光频率稳定在法布里-珀罗(F-P)腔上。振动噪声为 F-P 腔的主要噪声之一, 为了降低 F-P 腔的振动敏感性, 理论分析了激光频率稳定的 F-P 腔振动敏感性。通过有限元方法模拟分析了 F-P 腔的弹性形变与其形状和支撑位置的关系, 设计了激光波长为 534 nm 时激光振动敏感性为 0.53 kHz/(m·s²) 的 F-P 腔, 为实现低振动噪声激光提供了理论依据, 在原子钟和精密谱测量领域具有重要的应用价值。

关键词 激光光学; 法布里-珀罗腔; 振动敏感性; 有限元方法; 弹性形变

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0714003

Design of Fabry-Pérot Cavity with Low Vibration Sensitivity

Shang Junjuan^{1,3,4,5}, Zhu Xianwei¹, Zhang Hao^{1,3}, Zhang Yanyan¹, Zhou Peilin^{1,3,4,5},
Hu Jiandong^{1,3}, Zhang Mengjiao^{2*}

¹College of Mechanical & Electrical Engineering, Henan Agricultural University,
Zhengzhou, Henan 450002, China;

²College of Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, 450002 China;

³Henan International Joint Laboratory of Laser Technology in Agriculture Sciences,
Zhengzhou, Henan 450002, China;

⁴Zhengzhou Key Laboratory of Agricultural Biomimetic Materials and Low Carbon Technology,
Zhengzhou, Henan 450002, China;

⁵Zhengzhou Key Laboratory of Agricultural Equipment Intelligent Design and Green Manufacturing,
Zhengzhou, Henan 450002, China

Abstract Aluminum ion optical clock transition has a natural linewidth of 8 mHz. The detection laser's linewidth must be ~1 Hz to obtain the optical clock transition spectral line. The semiconductor laser has a linewidth of 500 kHz and a long-term drift of 90 MHz/h. The laser frequency is locked on the Fabry-Pérot (F-P) cavity to meet the requirements of aluminum ion spectral detection. One of the main noises of the F-P cavity is vibration noise. To reduce the vibration sensitivity of the F-P cavity, this study theoretically analyzes the vibration sensitivity of the F-P cavity with stable laser

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-06-04; 录用日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(32071890, 31671581)、河南省科技攻关(21202310527)、河南农业大学博士启动基金(30500615)

通信作者: *zhangmengjiao@henau.edu.cn

frequency. The finite element method is used to investigate the relationships between the elastic deformation of the F-P cavity as well as its shape and support position. An F-P cavity is designed with a laser vibration sensitivity of $0.53 \text{ kHz}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ at a laser wavelength of 534 nm. It provides a theoretical foundation for realizing low vibration noise lasers and has important applications in the fields of atomic clocks and precise spectrum measurement.

Key words laser optics; Fabry-Pérot cavity; vibration sensitivity; finite element method; elastic deformation

1 引言

时间计量在生活、战争和航海等方面具有重要意义。生活中人们按照规定的时间上班;战场中导弹用精密接收装置从导航卫星接收信号,然后通过计时器计算接收信号所用的时间,以此确定自身位置,从而校正航向,准确击中目标;在航海领域,1 s 的时间误差就会使船的航向偏离约 400 m。此外,国际单位制中长度、质量、电流、热力学温度和发光强度的定义都与时间紧密相连,如:1 m 为光在真空中传输 $1/299792458 \text{ s}$ 的长度;1 A 为 1 s 内通过 $1019/1.602176634$ 个元电荷对应的电流。随着科技发展的不断进步,时间计量方式逐渐由日晷、沙漏、水钟、摆钟到石英钟,1 d 的时间测量误差小于 1 ms ^[1]。1967 年开始,以原子钟作为时间计量标准,将 1 s 定义为无干扰的 ^{133}Cs 原子基态两超精细能级之间跃迁周期的 9192631770 倍^[2]。目前,光钟的稳定度和准确度都超过了微波钟,有望取代微波钟重新定义秒。

光钟通过伺服环路将晶体振荡器或激光器的频率锁定在原子、分子或离子的跃迁谱线上,使晶体振荡器或激光器的频率稳定度与原子、离子或分子跃迁频率相同。常用频率的稳定度、准确度和复现度三个参数表征光钟的性能^[3]。光钟的稳定度指系统每次测量得到的频率值之间的接近程度,与参考跃迁频率的半峰全宽成正比。若要实现高稳定度的光钟,需选择钟跃迁频率半峰全宽较小的离子或原子作为载体,如钙离子^[4]、铝离子^[5]、镱原子^[6]和铟离子^[7],对应的光钟跃迁谱线线宽分别为 1.4 Hz、8 mHz、10 mHz 和 0.8 Hz。实验中通过共振频率的激光激发光钟跃迁获得钟跃迁谱线,为了得到极窄的跃迁谱线,需要频率稳定度较高、线宽超窄的激光探寻这些离子、原子的跃迁,得到线宽约为 10 Hz 的钟跃迁谱线,探测激光的线宽要达到 Hz 量级^[8]。半导体激光器输出的激光线宽约为 500 kHz,频率漂移量为 90 MHz/h,为了满足实验需求,利用法布里-珀罗(F-P)腔作为参考^[9],将半导体激光器输出的激光锁定在 F-P 腔上,确保激光频率稳定。

铝离子的钟跃迁为 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$, 相应的跃迁频率为

267.4 nm,自然线宽为 8 mHz^[10]。为了提高谱线的测量精度,需用线宽小于 1 Hz 的激光探测跃迁谱线,可通过对 1064 nm 激光进行四倍频得到所需激光^[11]。首先,将 1064 nm 激光进行二倍频得到 534 nm 激光,并通过 PDH (Pound-Drever-Hall)^[12] 方法将 534 nm 激光锁定在超高细度的 F-P 腔上;然后,将锁定后的 534 nm 激光进行二倍频,获得高稳定窄线宽的 267.4 nm 激光。为了获得线宽为 1 Hz 的 267.4 nm 激光,需要将 534 nm 激光的线宽压缩到 0.5 Hz,这对 534 nm 激光的 PDH 稳频提出了更高的要求。534 nm 激光的频率与 F-P 腔的长度关系为 $\Delta\nu/\nu = \Delta l/l$ 。其中, ν 为激光频率, l 为 F-P 腔的光学长度, $\Delta\nu$ 为激光频率的变化量, Δl 为 F-P 腔长的变化量。可以发现,要使激光的线性漂移小于 0.5 Hz, F-P 腔的相对腔长变化量需小于 9×10^{-16} 。

F-P 腔的光学长度由腔内折射率和腔镜之间的距离决定,腔内折射率与腔内的温度、压强和湿度等因素有关。为了降低外界因素对 F-P 腔光学长度的影响,首先,将 F-P 腔密闭在真空度为 10^{-6} Pa 的真空腔内;然后,通过主动和被动控温方式将温度控制在 F-P 腔热膨胀系数为 0 的温度处,降低环境温度对腔长的影响;最后,将 F-P 腔放置在主动或被动隔振平台上,隔离地面振动对其光学长度的影响。这些措施虽然极大提高了腔长的稳定性,但隔振平台只能滤除大部分高频振动,很难隔离掉频率低于 10 Hz 的低频振动。这些低频振动会导致 F-P 腔的腔体发生弹性形变,使腔镜发生相对倾斜和相对位移,进而引起 F-P 腔光学长度的变化。可通过减小 F-P 腔的振动敏感性进一步降低振动对腔长的影响,而 F-P 腔的振动敏感性与腔的形状、安装位置有关,因此,本文采用有限元方法模拟不同结构 F-P 腔对应的振动敏感性,找到振动敏感性最小的结构和安装位置,为低振动敏感性 F-P 腔的设计和搭建提供了理论依据。

2 低振动敏感性 F-P 腔的设计

传统的 F-P 腔是平凹腔,主要由一片平面反射镜、一片凹面反射镜和一个连接反射镜的腔体组成。其中,反射镜需镀上高反射率膜,使反射率达

到 99.999%，且反射镜与腔体均需采用低热膨胀系数的材料制备。F-P 腔的材料选用超低膨胀系数玻璃 (ULE)，ULE 材料的热膨胀系数 $\alpha_{ULE} = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2$ 。其中， $a = 2.4 \times 10^{-9}/K^2$ ， $b = 10^{-11}/K^3$ ， T 为环境温度， T_0 为 ULE 热膨胀系数为 0 时对应的温度。

2.1 F-P 腔形变的静应力分析

圆柱形 F-P 腔的模型如图 1 所示。其中， C_x 和 C_y 为 L 型切口的尺寸， d 为氟橡胶 (Viton) 球到腔体端面的距离。F-P 腔的主体为圆柱体 (腔体)，长度和底面直径分别为 300 mm 和 100 mm，材料为 ULE。在圆柱体上加工一个直径为 15 mm 的通光孔，通光孔与圆柱体同轴；在腔体中段的上方加工一个与通光孔连通、直径为 2 mm 的孔，用于抽真空；在圆柱体的两侧对称切割一个 L 型切口，用于腔体支撑，F-P 腔通过四个对称放置的氟橡胶小球支撑在 U 型槽上，模拟过程中省略 U 型槽。腔体两端通过光胶合方法连接两片低损耗、高反射率的反射镜片 (腔镜)，厚度和直径分别为 6.3 mm 和 25.4 mm，材料为 ULE。腔镜与腔体的通光孔同轴，且两个腔镜反射面相向放置。激光从 F-P 腔轴线处耦合到腔体中，光学谐振腔的长度是腔镜内表面中心点之间的距离。

隔振平台隔离振动后，腔体感受到的振动频率

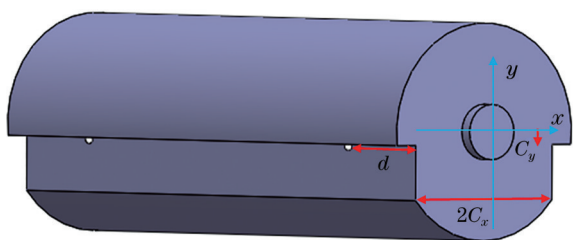


图 1 F-P 腔的模型

Fig. 1 Model of the F-P cavity

低于 10 Hz，因此，选用静应力分析模块对腔体的振动敏感性进行分析。约束条件设置为四个氟橡胶小球底面固定且在竖直方向上施加加速度为 g (-9.81 m/s^2) 的力。将 F-P 腔和支撑小球的材料分别设置为 ULE 和氟橡胶，材料的弹性模量 (E)、泊松比 (μ)、质量密度 (ρ) 和屈服强度 (σ_s) 如表 1 所示。为了在提高计算精度的同时节约电脑资源，根据各零件的尺寸划分合适的网格，氟橡胶小球的网格尺寸为 0.5 mm，腔体和腔镜的网格尺寸为 3 mm。

表 1 F-P 腔的材料参数

Table 1 Material parameters of the F-P cavity

Material	E /MPa	μ	ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	σ_s /MPa
ULE	67600	0.17	2210	370
Viton	7.840	0.47	1820	30

在外力作用下 F-P 腔产生的弹性形变如图 2(a) 所示，可以发现，腔镜不仅有轴向位移 (s_z)，还会发生倾斜。F-P 腔的稳定性只与相对腔长变化量和两腔镜的平行度有关，与每个腔镜的形变无关。为了方便探测相对腔长变化量及腔镜的平行度，仿真后测量腔镜内表面的轴向位移，探测点的位置如图 2(b) 所示。探测数据中，以两片腔镜中心 o 、 o' 的轴向位移差表征相对腔长的变化量，从而标定腔长受振动的影响情况；以两片腔镜上对应位置的轴向位移差表征两片腔镜的平行度。F-P 腔的相对腔长变化量和腔镜平行度与 F-P 腔形状 (切割尺寸 C_x 、 C_y) 和氟橡胶球到腔体端面的距离 d 相关。只有某个特定形状的 F-P 腔在合适的支撑位置时相对腔长变化量最小且腔镜平行度较好，此时 F-P 腔和支撑位置是最合适的。实验的目的是利用有限元分析方法寻找具有最佳支撑位置的 F-P 腔结构，最大程度上减小振动对 F-P 腔的影响。

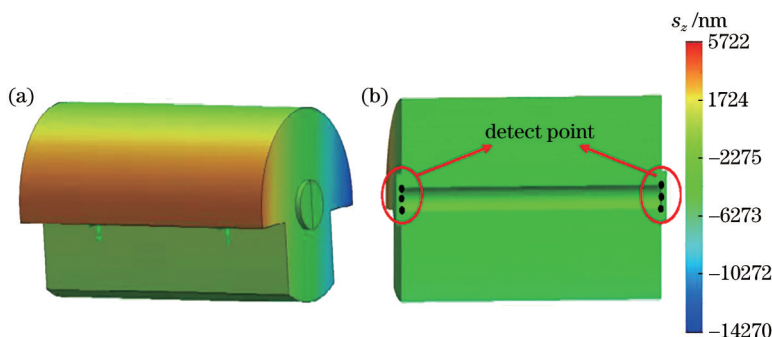


图 2 F-P 腔的形变。(a)形变示意图；(b)形变的探测位置

Fig. 2 Deformation of the F-P cavity. (a) Schematic diagram of deformation; (b) detection position of deformation

2.2 仿真结果及分析

仿真时通过改变 C_y , 扫描 C_x 和 d , 找到每个 C_y 和 C_x 组合相对腔长变化量最小和平行度最高时对应的 d 。图 3(a) 为 $C_y = -6$ mm、 $C_x = 25$ mm 时竖直方向上相对腔长变化量和腔镜平行度随 d 的变化规律。可以发现, 相对腔长变化为 0 和两镜片平行时对应的 d 分别为 50 mm 和 62.2 mm, 这表明 $C_y = -6$ mm、 $C_x = 25$ mm 不是最佳的切割尺寸。图 3(b) 为 $C_y =$

-6 mm 时竖直方向上相对腔长变化为 0 和腔镜平行时 d 随 C_x 的变化规律。可以发现, $C_y = -6$ mm、 $C_x = 38.98$ mm 时腔镜相对位移为 0 和两片腔镜在竖直方向平行时对应同一个 d , 为 62.14 mm。此时, 水平和竖直方向上腔镜平行度和相对腔长随 d 的变化规律如图 4 所示, 可以发现, 当 $d = 62.14$ mm 时腔镜平行, 相对腔长变化量为 $9.3 \times 10^{-12}/g$ 。这表明 $C_y = -6$ mm、 $C_x = 38.98$ mm 为最佳切割尺寸。

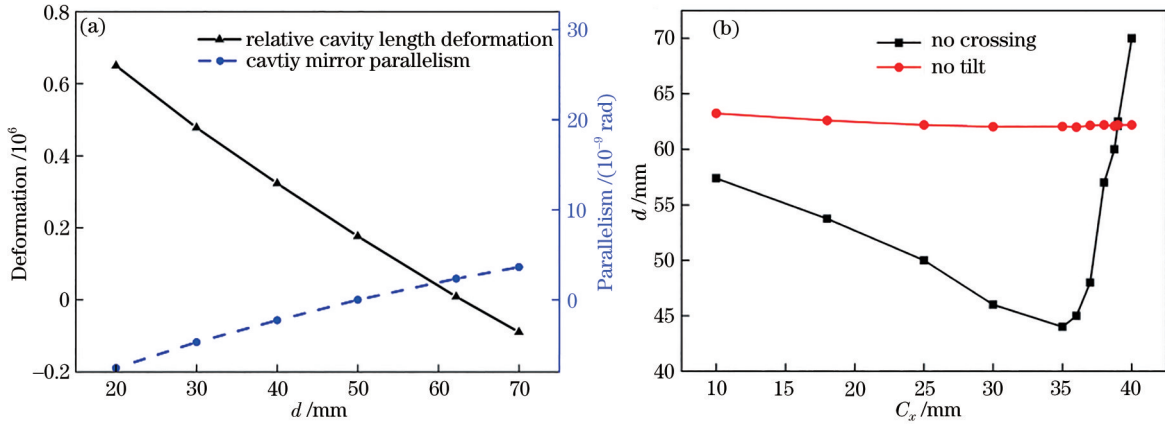


图 3 $C_y = -6$ mm 时的仿真结果。(a) 相对腔长变化和腔镜平行度与 d 的关系; (b) d 随 C_x 的变化曲线

Fig. 3 Simulation results when $C_y = -6$ mm. (a) Relationship between relative cavity length change and cavity mirror parallelism with d ; (b) variation curve of d with C_x

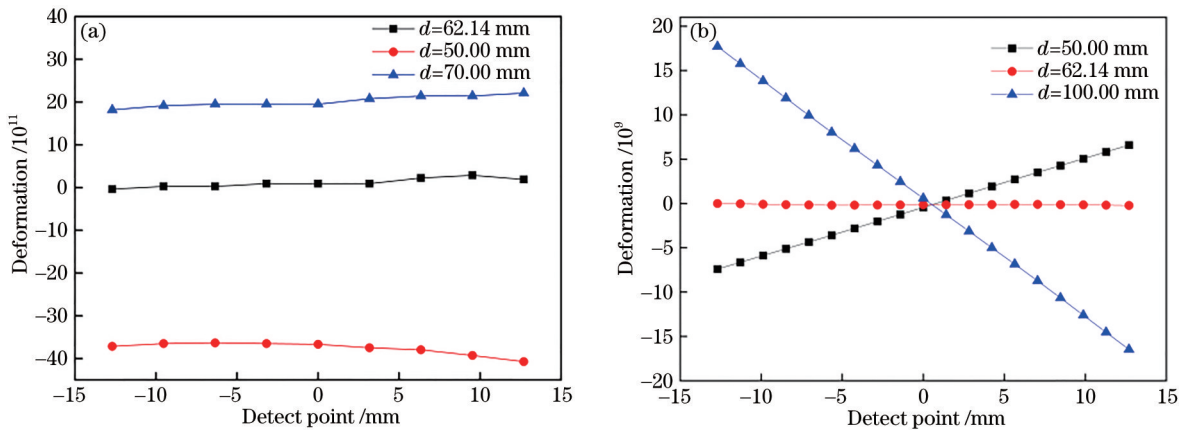


图 4 相对腔长变化量和腔镜平行度随 d 的变化曲线。(a) 水平方向; (b) 竖直方向

Fig. 4 Variation curve of the relative cavity length and the parallelism of the cavity mirror with d . (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

实验中通过加速度计和快速傅里叶变换仪 (FFT) 测量主动隔振平台 (TS150) 上的振动功率谱密度 (PSD), 结果如图 5 所示。可以发现, 主动隔振平台上的振动噪声在 $10^{-6} g \cdot Hz^{-1/2}$ 量级, 此时由振动引入的相对腔长变化量为 9.3×10^{-18} , 低于热噪声极限, 满足实验需求。将波长为 534 nm 的激光锁定在该光学谐振腔上时, 振动敏感性为 0.53 kHz/($m \cdot s^2$)。

实际安装光学谐振腔时不可避免地存在安装

偏差, 因此, 模拟分析了不同 C_x 对应的安装位置每偏离 1 mm 时振动敏感性的变化率 (Slope)。图 6 为 $C_y = -6$ mm 时支撑位置每偏移 1 mm 对应的频率噪声谱 (激光波长为 534 nm) 与切割尺寸 C_x 的关系。可以发现, 噪声谱随着 C_x 的增大而减小。为了降低安装偏差引入的噪声, 如果 F-P 腔具有两个或多个最佳切割尺寸和支撑位置时, 应选择 C_x 较大的一组数据作为最佳切割尺寸和支撑位置。

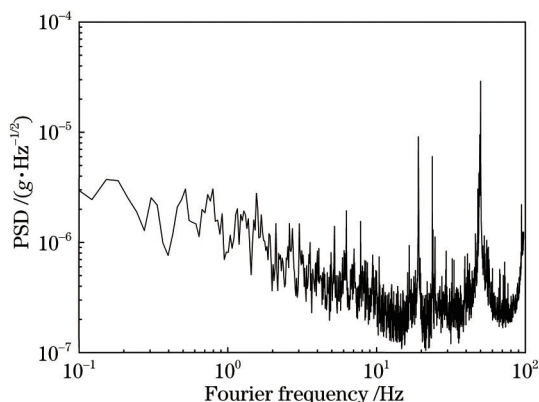


图 5 隔振平台上的 PSD

Fig. 5 PSD of the vibration isolation platform

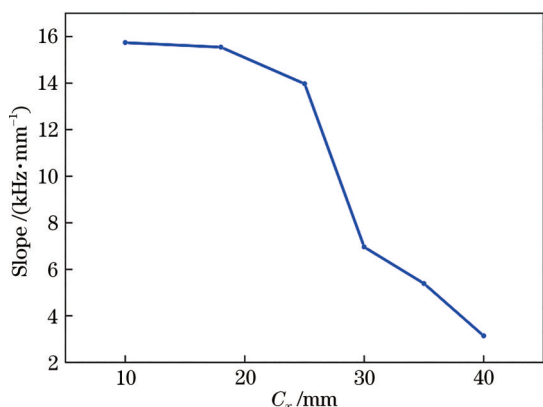


图 6 安装偏差为 1 mm 时振动敏感性变化率随 C_x 的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of slope of vibration sensitivity with C_x when installation deviation is 1 mm

3 结 论

通过有限元分析法定量分析了光学谐振腔弹性形变与其形状和安装结构的关系,进而设计了低振动敏感性的光学谐振腔。光学谐振腔为圆柱形,长度和底面直径分别为 300 mm 和 100 mm,切割尺寸 $C_x=38.98$ mm, $C_y=-6$ mm,氟橡胶小球到腔体端面的距离为 62.14 mm,相对腔长变化量为 $9.3 \times 10^{-12}/g$ 。将波长为 534 nm 的激光锁定在该光学谐振腔上时,振动敏感性为 0.53 kHz/($m \cdot s^2$)。该研究为实现低振动敏感性的光学谐振腔提供了理论依据,也为铝离子钟跃迁探测激光的实现奠定了基础。

参 考 文 献

[1] Horton J W, Marrison W A. Precision determination of frequency[J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1928, 16(2): 137-154.

[2] Feng J J, Su H, Gao J, Ge C X, Summary of International Metrology Conferences (Continued)[J]. China Metrology, 2007(2): 45-48.
冯俊杰, 苏红, 高洁, 葛楚鑫. 历届国际计量大会梗概(续)[J]. 中国计量, 2007(2): 45-48.

[3] Wang Y Q, Wang Q J, Fu J S, et al. Principles of quantum frequency[M]. Beijing: Science Press, 1989.
王义遒, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

[4] Huang Y, Guan H, Zeng M Y, et al. $^{40}\text{Ca}^+$ ion optical clock with micromotion-induced shifts below 1×10^{-18} [J]. Physical Review A, 2019, 99: 011401.

[5] Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C J, et al. Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(7): 070802.

[6] Fürst H, Yeh C H, Kalincev D, et al. Coherent excitation of the highly forbidden electric octupole transition in $^{172}\text{Yb}^+$ [J]. Physical Review Letters, 2020, 125(16): 163001.

[7] Ohtsubo N, Li Y, Nemitz N, et al. Frequency ratio of an $^{115}\text{In}^+$ ion clock and a ^{87}Sr optical lattice clock[J]. Optics Letters, 2020, 45(21): 5950-5953.

[8] Wang P, Zhang K S, Wei Z Y, et al. Preface of “advanced laser technology and application” [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501000.
王璞, 张宽收, 魏志义, 等. “先进激光技术与应用”专题前言[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501000.

[9] Yao B, Chen Q F, Chen Y J, et al. 280 MHz linewidth DBR fiber laser based on PDH frequency stabilization with ultrastable cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501014.
姚波, 陈群峰, 陈雨君, 等. 基于超稳腔 PDH 稳频的 280 MHz 线宽 DBR 光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501014.

[10] Rosenband T, Schmidt P O, Hume D B, et al. Observation of the $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ clock transition in $^{27}\text{Al}^+$ [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(22): 220801.

[11] Wei L J, Cao J, Zhang Q M, et al. Frequency doubling of fiber laser based on narrow linewidth grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914010.
韦丽娟, 曹剑, 张庆茂, 等. 基于窄线宽光栅的光纤激光器倍频技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914010.

[12] Black E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79-87.