

# 积分球冷原子钟探测光功率自动稳定实验研究

李 琳 刘 鹏 吉经纬 成华东 刘 亮\* 王育竹

中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800

**摘要** 建立了微瓦量级的激光功率自动稳定实验装置, 通过自动反馈控制声光调制器的衍射效率, 实现了激光功率的自动稳定。激光功率稳定后, 激光相对强度噪声得到有效抑制, 接近散弹噪声极限, 激光功率的长期稳定度优于  $2 \times 10^{-5}$  (1000 s)。推导了功率自动稳定系统的环路方程, 分析了激光功率稳定环路对相对强度噪声的抑制作用。稳定后的激光应用于积分球冷原子钟的钟跃迁探测, 对原子钟稳定度的影响小于  $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ , 积分球原子钟的频率稳定度优于  $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$  ( $\tau$  为取样时间)。

**关键词** 激光光学; 激光稳定; 冷原子钟; 激光冷却

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0814004

## Probe Laser Power Stabilization for Integrated Sphere Cold Atom Clock

Li Lin Liu Peng Ji Jingwei Cheng Huadong Liu Liang Wang Yuzhu

*Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

**Abstract** A laser power stabilization system for the  $\mu\text{W}$  probe laser is developed. Power stabilization is realized by automatically adjusting diffraction efficiency of the acousto-optic modulator. The relative intensity noise of the probe laser is effectively suppressed to the shot noise limit, and the long-term stability is better than  $2 \times 10^{-5}$  (1000 s). The loop function equation of the power stabilization system is deduced, and the suppression effect of the loop on the relative intensity noise is analyzed. The stabilized laser is applied to detecting the clock transition of the integrating sphere cold atom clock, and its contribution to the frequency stability is less than  $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$  ( $\tau$  is the sampling time). The frequency stability of the clock is improved to better than  $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ .

**Key words** laser optics; laser stabilization; cold atom clock; laser cooling

**OCIS codes** 140.3425; 020.3320; 130.3120; 120.6085

## 1 引 言

功率稳定的稳频激光器在量子频标和精密测量中有广泛应用, 例如光探测的被动型原子钟、亚赫兹超窄线宽激光器、光梳下变频产生低相噪微波信号、激光干涉仪引力波探测装置<sup>[1-4]</sup>。激光功率的稳定度对于这些测量和装置的性能有非常重要的作用。激光功率的稳定度主要受到散弹噪声的限制, 文中所列文献研究的多为功率较大的激光(毫瓦量级), 且多采用电光调制器(EOM)作为执行器<sup>[3-4]</sup>。本文所研制的积分球冷原子钟采用吸收法探测钟跃迁信号, 在探测冷原子信号的同时, 尽量不加热原子并减小探测光频移, 激光功率在微瓦量级。探测光的功率波动会直接耦合到吸收信号中, 该吸收信号用于产生频率闭环控制的电压信号, 从而影响钟输出信号的频率稳定度。同样, 探测光功率的长期漂移也会导致钟输出信号的漂移, 为使短

**收稿日期:** 2016-03-11; **收到修改稿日期:** 2016-04-08

**基金项目:** 国家 863 计划(2012AA120702)

**作者简介:** 李 琳(1983—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事控制系统和原子频标等方面的研究。

E-mail: lilin@siom.ac.cn

**导师简介:** 王育竹(1932—), 男, 博士, 研究员, 院士, 主要从事冷原子物理和量子频标等方面的研究。

E-mail: yzwang@mail.shcnc.ac.cn

\* **通信联系人.** E-mail: liang.liu@siom.ac.cn

期频率稳定度达到  $10^{-13}$ 、长期稳定度达到  $10^{-15}$ ，激光的长期功率稳定度必须达到  $10^{-5}$  (1000 s)。自由运转的半导体激光器的功率稳定度一般为  $10^{-3}$ ，经过传输过程，特别是光纤传输后，激光的功率稳定度为  $10^{-2}$ ，显然不能满足积分球冷原子钟的需求，必须采用主动激光功率稳定。

本文采用声光调制器(AOM)作为执行器,通过自动反馈控制 AOM 的 1 级衍射光的射频驱动功率,输出微量级探测光的功率稳定模块,优化了光路设计。选择适当的环路带宽,使得相对强度噪声达到散弹噪声的极限,其对原子钟稳定度的影响小于  $10^{-13} \tau^{-1/2}$  ( $\tau$  为取样时间)。

## 2 实验装置和基本原理

积分球冷原子钟的钟跃迁探测光使用 Toptica DL pro(德国)半导体激光器作为光源,激光频率通过饱和和吸收模块锁定在  $^{87}\text{Rb}$  D2 线  $5^2\text{S}_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}, |F'=2\rangle$  和  $5^2\text{S}_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}, |F'=3\rangle$  的交叉峰上。经过 AOM 移频 209.2 MHz,1 级衍射光的频率红失谐于 D2 线  $5^2\text{S}_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}, |F'=3\rangle$  跃迁 2.6 MHz<sup>[5-6]</sup>。通过电压控制 AOM 射频驱动信号的频率和功率,以此调节 1 级衍射光的频率和功率。图 1 所示为激光功率自动稳定系统的原理图。激光移频采用两次经过同一 AOM 进行衍射的结构,使得衍射后的光斑位置不会因为 AOM 调频电压的改变而改变,有利于保证光路的稳定性。1 级衍射光通过非偏振分束器(BS020,Thorlabs,美国,分光比 1:1)分为 2 束,第 1 束作为探测光输出 ( $P_{\text{det}}$ ),用于探测积分球原子钟的钟跃迁信号;第 2 束作为监测光输出 ( $P_{\text{mon}}$ ),由光电管接收,经过跨导放大器(TIA)转换为电压信号。比较该电压信号与基准电压  $U_{\text{ref}}$ ,产生误差信号,经过低通滤波后的电压反馈控制 AOM 射频驱动信号的功率,从而改变 1 级衍射光的功率,实现激光功率的闭环控制,得到稳定的探测光功率输出。探测光功率约为  $5 \mu\text{W}$ ,直径约为 2 mm。探测光功率可以通过改变电压基准来调节,光功率锁定在电压基准上。

实验发现,探测光的偏振面随着时间增加而旋转,而在积分球原子钟探测光路中,功率稳定后偏振的变化会转化为功率的变化,影响钟信号探测。因此在非偏振分束器前面增加一个消光比大于  $2 \times 10^4$  的纳米颗粒线性薄膜偏振片(LPVIS050,Thorlabs,美国),将激光偏振面的旋转转化为功率的起伏,再通过后面的功率稳定环路修正功率起伏。

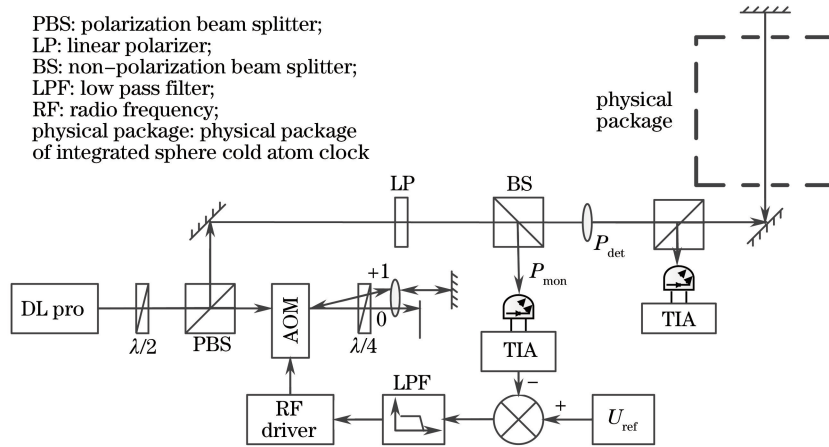


图 1 激光功率自动稳定原理图

Fig. 1 Schematic of laser power stabilization system

推导激光功率自动稳定控制环路方程并进行环路噪声分析,过程如下。首先设置射频驱动信号的功率,使 AOM 工作在线性区域,可以得到入射到监测光电管的功率为

$$P_{\text{mon}} = P_0 + u_y K_{\text{AOM}} K_{\text{BS}}, \quad (1)$$

式中  $P_0$  为工作点处的光功率,  $K_{\text{AOM}}$  为工作点处 AOM 的 1 级衍射效率,  $K_{\text{BS}}$  为非偏振分束器的分光比,  $u_y$  为射频功率压控电压。根据图 1 所示实验装置可得到简化环路模型,如图 2 所示。根据反馈控制原理,稳定后的激光功率波动可以表示为

$$\Delta P_{\text{mon}} = \frac{1}{1+\gamma} \Delta P_0 + \frac{\gamma}{1+\gamma} \frac{\Delta U_{\text{ref}} - \Delta U_{\text{TIA}}}{K_{\text{PD}}}, \quad (2)$$

式中  $\gamma = K_L K_{\text{AOM}} K_{\text{BS}} K_{\text{PD}}$  为环路开环增益,  $K_L$  为环路滤波器增益,  $K_{\text{PD}} = \eta R$  为 TIA 放大系数,  $\eta$  为光电管转换效率,  $R$  为 TIA 电阻,  $\Delta P_0$  为自由运转激光的功率波动,  $\Delta U_{\text{ref}}$  为电压基准的电压波动,  $\Delta U_{\text{TIA}}$  为放大器噪声。从(2)式可以看出, 光功率波动  $\Delta P_0$  得到有效抑制。同时电压基准噪声和放大器噪声会反映到光功率波动中。根据文献[3], TIA 输出电压  $\Delta U_{\text{TIA}}$  的噪声主要包括电阻热噪声、运算放大器的电压和电流噪声、光探测散弹噪声。其中光探测散弹噪声引起的电压起伏起主导作用。由散弹噪声引起的相对强度起伏的频率谱密度可以表示为

$$S^{\text{shot}} = \frac{q}{2\eta P_{\text{mon}}}. \quad (3)$$

对于一个典型的参数  $\eta = 0.5 \text{ A/W}$ ,  $P_{\text{mon}} = 5 \mu\text{W}$ ,  $q$  为电子电荷,  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 可以得到散弹噪声引起的相对强度噪声的频率谱密度  $S^{\text{shot}} = -133 \text{ dBc/Hz}$ 。

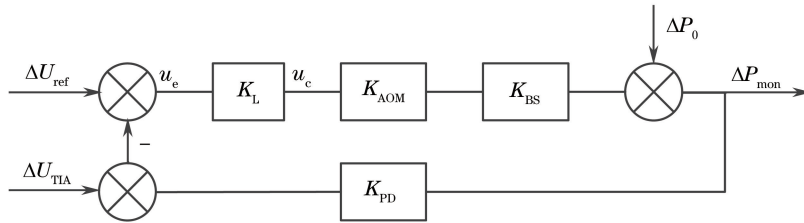


图 2 激光功率自动控制环路模型

Fig. 2 Loop model of laser intensity control system

### 3 实验结果和分析

实验采用光电管为 PIN 硅管(S2386-44K, Hamamatsu, 日本), 光电转换效率为  $0.5 \text{ A/W}$ 。探测光功率为微瓦量级, 经过光电管转换后光电流为微安量级, 选择适当的 TIA 电流/电压转换系数为  $10^6$ , 同时 TIA 对噪声有一定的滤波作用, 可防止信号振荡, 带宽为  $100 \text{ kHz}$ 。TIA 采用精密运算放大器(OP27)和低温漂电阻( $100 \text{ k}\Omega$ ), 光电流信号转换为电压信号后放大 10 倍。电压基准源选择深埋层齐纳二极管电压基准源(LM399)作为参考, 温度系数为  $0.3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。环路滤波器采用一阶有源滤波器, 需选择适当环路增益使环路带宽足够大, 从而使带内噪声得到最大程度的抑制, 同时又不能增加带外噪声的影响。选择带宽约为  $15.9 \text{ kHz}$ 。探测光的相对强度噪声谱密度采用快速傅里叶变换频谱分析仪(SR770, Stanford Research System, 美国)测量光电管转换后的电压输出噪声得到。

图 3 所示为环路内光电探测器输出电压的频率谱密度。首先关闭入射光, 红色曲线表示 TIA 输出的电压噪声, 主要包括光电管暗电流和 TIA 噪声。黑色曲线表示入射光打开时电压噪声的频率谱密度, 噪声主要包括入射光噪声和放大电路噪声, 频率大于  $1 \text{ kHz}$  时主要体现激光的散弹噪声。红色的水平直线给出了散弹噪声对电压波动的影响极限(入射光功率约为  $5 \mu\text{W}$ )。

图 4 所示为激光功率自动稳定前后的探测光相对强度噪声谱密度, 探测光功率约为  $5 \mu\text{W}$ 。红色直线表示光功率在  $5 \mu\text{W}$  时的散弹噪声极限。黑色曲线表示光功率稳定未打开时探测光的相对强度噪声谱密度。红色曲线表示光功率稳定打开时环路内监测光的相对强度噪声谱密度。光电管噪声和电路噪声同时得到抑制, 环路内噪声抑制大约为  $-20 \text{ dB/dec}$ 。蓝色曲线表示光功率稳定打开时环路外监测光的相对强度噪声谱密度。频率在  $10 \sim 1000 \text{ Hz}$  范围内时, 探测光相对强度噪声得到很好的抑制, 接近散弹噪声的极限。从图 4 可以看出, 环路内和环路外噪声谱密度存在一定的差异, 原因在于两路探测噪声相互独立, 包括光电管的低频噪声、电阻热噪声、激光传输路径噪声、温度波动、杂散光、偏振扰动等<sup>[7]</sup>。可以通过减小探测器噪声, 例如将放大电路置于恒温槽或真空中, 进一步减弱电路噪声的影响, 减小环路内和环路外噪声的差异<sup>[8]</sup>。

通过测量 TIA 的输出相对电压波动, 得到光功率波动的长期稳定度。图 5 所示为探测光功率稳定后相对强度起伏的长期稳定度测试结果, 采用 Allan 方差表示, 长期稳定度达到  $10^{-5}$  ( $1000 \text{ s}$ )。激光功率的长期

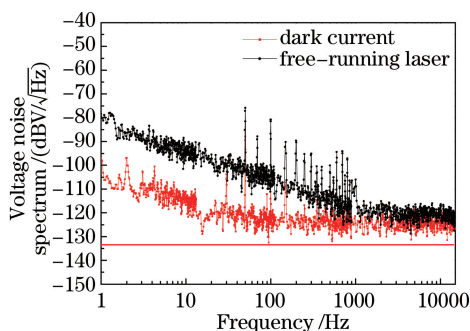


图 3 光电探测器输出电压的频率谱密度  
Fig. 3 Output voltage noise spectra of photoelectric detector

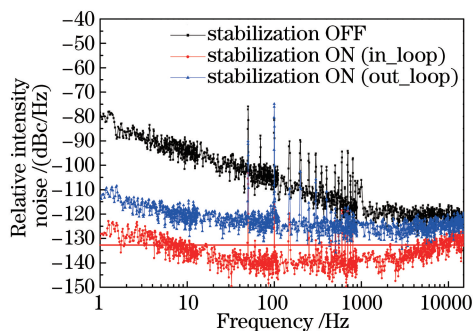


图 4 功率稳定对激光相对强度噪声谱密度的影响  
Fig. 4 Effect of power control system on laser spectral density of relative intensity noise

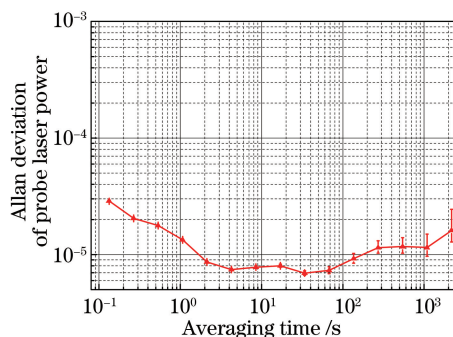


图 5 探测光功率稳定后相对强度起伏的长期稳定度  
Fig. 5 Effect of power control system on long-term stability

稳定度锁定在电压基准源的长期稳定度上。从图 5 可以看出,稳定后激光功率在 100 s 后出现长期漂移,主要原因为采用的电压基准源 LM399 的长期稳定度受温度变化、器件老化和电压波动等环境因素的影响。另外,放大器的零点漂移和光路受环境变化导致的长期漂移也会导致激光功率的长期漂移。通过改善电路和光路环境温度的稳定度,可以进一步改善激光功率长期稳定度。

积分球原子频标采用吸收法探测钟跃迁信号,探测光功率的抖动会直接影响闭环反馈信号,脉冲型探测的光功率噪声对原子钟稳定度的影响类似于 Dick 效应<sup>[9]</sup>,会影响原子钟的频率稳定度。使用激光功率自动稳定系统后,功率起伏的影响小于  $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ ,积分球原子钟的频率稳定度优于  $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ <sup>[10]</sup>。

## 4 结 论

搭建了一个激光功率自动稳定系统,采用 AOM 作为执行器,光电管作为传感器,通过自动反馈控制 AOM 的衍射效率,实现激光功率的自动稳定。给出了环路方程,分析了环路对噪声的抑制,傅里叶频率在 10~1000 Hz 范围内时,激光相对强度噪声得到有效抑制,接近散弹噪声极限,长期稳定度为  $1 \times 10^{-5}$  (1000 s)。使用激光功率稳定系统后,探测光相对强度噪声对原子钟频率稳定度的影响小于  $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。

## 参 考 文 献

- Godone A, Levi F, Micalizio S, *et al.* Frequency-stability performances of the pulsed optically pumped rubidium clock: Recent results and future perspectives[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 378-382.
- Deng J L, Hu Z F, Li L, *et al.* Research on characteristics of pulsed optically pumped rubidium frequency standard[C]. Proceedings of 7<sup>th</sup> Symposium on Frequency Standards and Metrology, Pacific Grove, 2008: 348-352.
- Ivanov E N. Wide-band suppression of laser intensity noise[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectric Frequency Control, 2009, 56(1): 22-26.
- Seifert F, Kwee P, Heurs M, *et al.* Laser power stabilization for second-generation gravitational wave detectors[J].

- Optics Letters, 2006, 31(13): 2000-2002.
- 5 Meng Yanling, Zheng Benchang, Liu Peng, *et al.* Experiment studies on the diffuse light cooling by using silver plated microwave cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0918001.  
孟艳玲, 郑本昌, 刘 鹏, 等. 积分球与微波腔一体化装置的研制[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0918001.
  - 6 Meng Yanling, Zheng Benchang, Liu Peng, *et al.* Experiment studies on the diffuse light cooling by using silver plated microwave cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0902001.  
孟艳玲, 郑本昌, 刘 鹏, 等. 微波腔镀银实现漫反射冷却的实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0902001.
  - 7 Kwee P, Willke B, Danzmann K. New concepts and results in laser power stabilization[J]. Applied Physics B, 2011, 102(3): 515-522.
  - 8 Kwee P, Willke B, Danzmann K. Shot-noise limited laser power stabilization with a high-power photodiode array[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2912-2914.
  - 9 Micalizio S, Godone A, Calosso C, *et al.* Pulsed optically pumped rubidium clock with high frequency-stability performance[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectric Frequency Control, 2012, 59(3): 457-462.
  - 10 Liu P, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity[J]. Physical Review A, 2015, 92(6): 062101.