

# 积分球冷原子钟的探测光频率和强度噪声

王秀梅<sup>1,2</sup>, 孟艳玲<sup>1</sup>, 李 琳<sup>1</sup>, 王亚宁<sup>1,2</sup>, 于明圆<sup>1,2</sup>, 王 鑫<sup>1,2</sup>,  
肖 玲<sup>1</sup>, 万金银<sup>1</sup>, 成华东<sup>1</sup>, 刘 亮<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 对积分球冷原子钟(ISCAC)探测光的频率和强度噪声进行了理论分析和实验研究。通过功率稳定和杂散光去除,探测光相对强度噪声的功率谱密度在高频区域(0.1~10 kHz)最大被压缩了 15 dB,同时探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响被降低至  $9\tau^{-1/2} \times 10^{-15}$ ,其中  $\tau$  为积分时间。理论分析结果表明,目前探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响为  $2.5\tau^{-1/2} \times 10^{-13}$ 。提出了一种减小探测光频率噪声影响的实验方案,即在钟周期一定时适当增大探测时间。采用这种方法,可以将探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响减小至  $9.4\tau^{-1/2} \times 10^{-14}$ 。

**关键词** 激光光学; 冷原子钟; 频率稳定度; 探测光噪声

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0912001

## Frequency and Intensity Noises of Probe Laser in Integrating Sphere Cold Atom Clock

Wang Xiumei<sup>1,2</sup>, Meng Yanling<sup>1</sup>, Li Lin<sup>1</sup>, Wang Yaning<sup>1,2</sup>, Yu Mingyuan<sup>1,2</sup>,  
Wang Xin<sup>1,2</sup>, Xiao Ling<sup>1</sup>, Wan Jinyin<sup>1</sup>, Cheng Huadong<sup>1</sup>, Liu Liang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The frequency and intensity noise of the probe laser in the integrating sphere cold atom clock (ISCAC) are studied theoretically and experimentally. The power spectral density of the relative intensity noise of the probe laser in the high frequency region (0.1-10 kHz) is maximally compressed by 15 dB with the methods of stabilization of laser power and the removal of stray light, and simultaneously the influence of the probe laser frequency noise on the ISCAC frequency stability is decreased to  $9\tau^{-1/2} \times 10^{-15}$  where  $\tau$  is the integration time. The theoretical analysis results show that, up to now, the influence of the probe laser frequency noise on the ISCAC frequency stability is  $2.5\tau^{-1/2} \times 10^{-13}$ . Thus a scheme to reduce the influence of the probe laser frequency noise is proposed, that is, the detection time is increased appropriately in a certain clock cycle. With this method, the influence of the probe laser frequency noise on the ISCAC frequency stability can be reduced to  $9.4\tau^{-1/2} \times 10^{-14}$ .

**Key words** laser optics; cold atom clock; frequency stability; probe laser noise

**OCIS codes** 140.3320; 020.1335; 020.3320; 130.3120

收稿日期: 2017-04-11; 收到修改稿日期: 2017-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(11604353)、中国科学院青年创新促进会资助项目

作者简介: 王秀梅(1989—),女,博士研究生,主要从事激光冷却和原子钟方面的研究。E-mail: wangxiumei@siom.ac.cn

导师简介: 刘 亮(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事冷原子物理、原子钟和原子干涉仪等方面的研究。

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn(通信联系人)

## 1 引 言

对于光探测原子钟而言,探测光的噪声会直接影响原子钟的频率稳定度。目前,国内外学者已经在探测光噪声对原子钟频率稳定度的影响方面进行了大量理论分析和实验研究。2001年,Bize<sup>[1]</sup>指出探测光噪声对喷泉冷原子钟频率稳定度的影响与探测窗口有关,并且最大化地估算了探测光频率噪声的影响。2005年,Tremine等<sup>[2]</sup>参考该方法,评估了 Horace 吸收探测过程中探测光的频率噪声。2015年,Leveque等<sup>[3]</sup>同样参考该方法,评估了 Pharao 荧光探测过程中探测光的频率噪声。2012年,Micalizio等<sup>[4]</sup>指出,在脉冲式的光吸收探测法中,探测光强度噪声对脉冲光抽运原子钟频率稳定度的影响类似于 Dick 效应,且探测光强度噪声的来源主要有两个,一个是吸收过程中探测光强度起伏转换成的强度噪声(AM-AM),另一个是频率起伏转换成的强度噪声(PM-AM)<sup>[5]</sup>。2015年,Kang等<sup>[6]</sup>在实验上研究了探测光强度噪声对 Ramsey 型原子钟频率稳定度的影响。

积分球冷原子钟(ISCAC)<sup>[7-8]</sup>采用脉冲式的光吸收探测法,探测光的频率和强度噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响较大,但目前国际上关于 ISCAC 探测光频率和强度噪声的研究鲜有报道。本文对 ISCAC 探测光的频率和强度噪声进行了理论分析和实验研究,推导了脉冲式探测窗口在频域上对探测光强度噪声的滤波函数;实验上采用功率稳定和杂散光去除的方法,压缩了探测光的强度噪声;理论分析了探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响,并提出了一种减小探测光频率噪声影响的实验方案。

## 2 实验装置与理论分析方法

ISCAC 的光路原理如图 1 所示。通过饱和和吸收模块,冷却光激光器频率锁定在<sup>87</sup>Rb D2 线  $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{3/2}, |F'=1\rangle$  和  $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{3/2}, |F'=3\rangle$  的交叉峰上,其中 S、P 分别表示原子基态、激发态,  $F, F'$  分别为基态总量子数、激发态总量子数。经过双通道声光调制器(AOM)移频 189 MHz, +1 级衍射光的频率红失谐于 D2 线  $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{3/2}, |F'=3\rangle$ , 跃迁频率为 22.8 MHz。再抽运光和抽运光激光器的频率分别锁定在  $5^2S_{1/2}, |F=1\rangle \rightarrow 5^2P_{3/2}, |F'=2\rangle$  和  $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{3/2}, |F'=2\rangle$  跃迁峰上。多个偏振分光计(PBS)将冷却光、再抽运光和抽运光均匀地分成四束。多模光纤将这四束光垂直地耦合进物理系统内部,并形成漫反射光场。漫反射激光对原子进行冷却,并对冷原子团进行操控<sup>[9]</sup>。冷却之后的原子布居在  $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle$  态上。探测光的频率近共振于  $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{3/2}, |F'=3\rangle$  的跃迁频率。在进入物理系统之前,光由分光计(BS)分成两束,一束反射光作为环路内的监测光,由光电管(PD1)实时采集以表征光功率起伏。在伺服环路内,比较监测光与基准电压设定值,得到功率起伏的误差信号。误差信号经处理后,反馈控制 AOM 射频驱动器,以实现探测光功率稳定<sup>[10]</sup>。在参考文献[10]中,探测光的相对强度噪声从  $-90 \text{ dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$  被降低到  $-110 \text{ dBc}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。另一束透射光作为环路外探测光,经透镜组扩束,光斑直径增大到 6 mm。扩束后的探测光经过一个光轴与其偏振方向成  $45^\circ$  的  $1/4$  波片,变为圆偏振光进入物理系统。光由固定在物理系统上方的  $0^\circ$  平面反射镜反射下来后,形成驻波并吸收探测冷原子,透射光由光电管(PD2)接收。

ISCAC 的时序如图 2 所示,整个钟周期( $T_c=85 \text{ ms}$ )的所有时序均由机械开关控制完成。其中探测光机械开关的通光孔直径小于扩束后的探测光直径,故将探测光机械开关放在扩束透镜组的焦点位置上。<sup>87</sup>Rb 原子在微波腔内被漫反射激光冷却(冷却时间  $T=41.5 \text{ ms}$ ),温度低于  $100 \mu\text{K}$ <sup>[11]</sup>,然后被抽运光抽运到  $5^2S_{1/2}, |F=0\rangle$  态,抽运时间为  $T_p$ 。原子与微波间发生分离振荡场作用,两个  $\pi/2$  微波脉冲宽度( $\tau_p=1 \text{ ms}$ )被自由演化时间( $T_f=24 \text{ ms}$ )分开。最后,在探测时间( $T_d=5.5 \text{ ms}$ )内,使用光吸收探测法探测布居在  $5^2P_{3/2}, |F'=2\rangle$  态的冷原子数,取机械开关完全打开的时间段( $t_d=2 \text{ ms}$ )内所探测到的冷原子吸收光强作为钟信号。

在吸收探测过程中,冷原子的吸收光强  $I_a$  与探测光入射光强  $I_0$  之间遵循 Beer-Lambert 指数吸收定律<sup>[12]</sup>,即

$$I_a = I_0 \{1 - \exp[-n'(x, y)\sigma]\}, \quad (1)$$

式中  $n'(x, y)$  为垂直于探测光平面内的原子密度,  $\sigma$  为原子的吸收截面。

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{(2\Delta/\Gamma)^2 + 1}, \quad (2)$$

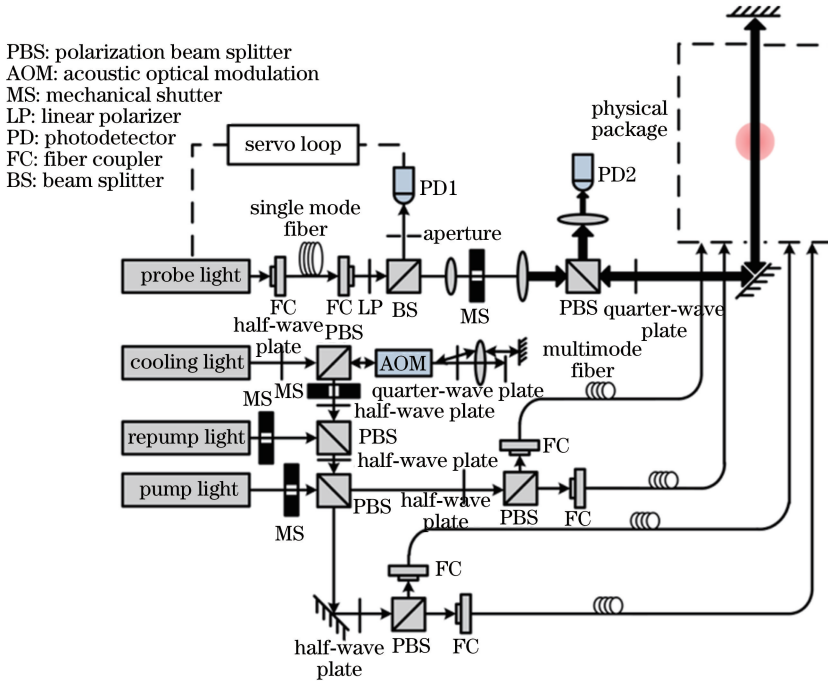


图 1 ISCAC 光路原理图

Fig. 1 Principle diagram of light path in ISCAC

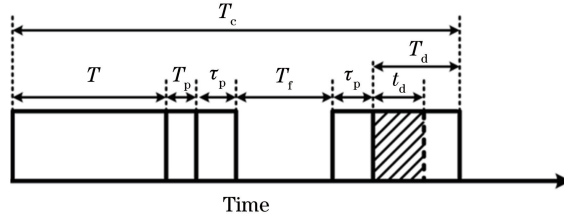


图 2 ISCAC 时序图

Fig. 2 Time sequence of ISCAC

式中  $\Delta$  为探测光频率和原子跃迁频率之间的失谐量,  $\Gamma$  为自然线宽,  $\sigma_0$  为探测光频率与原子跃迁频率共振时的吸收截面。在一阶近似下, 认为  $I_a = I_0 \sigma n'(x, y)$ , 即在原子密度恒定的情况下, 吸收光强由入射光强  $I_0$  和失谐量  $\Delta$  共同决定。可以发现, 探测光强度噪声  $\delta I_0$  会直接引起吸收光强起伏 ( $\delta I_a$ ), 而探测光的频率噪声  $\Delta \omega$  会通过影响吸收截面的起伏而引起吸收光强起伏 ( $\delta I_a$ )。

定义在每个钟周期  $T_c$  内, 探测窗口  $h(t)$  在时域上是一个矩形函数, 即

$$h(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_d \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (3)$$

如图 3(a) 所示。  $H(f)$  为  $h(t)$  经快速傅里叶变换后的函数,  $H(f) = [1 - \exp(-i2\pi f t_d)] / (2\pi f)$ , 其中  $f$  为傅里叶频率。  $H_0$  为  $h(t)$  的积分值, 即  $H_0 = \int_0^{t_d} h(t) dt$ 。  $|H_{\text{det}}(f)|^2 = |H(f) / H_0|^2$  为滤波函数, 探测窗口利用该滤波函数在傅里叶频域对探测光强度噪声进行低通滤波。类似于 Dick 效应, 脉冲式探测只会将探测光强度噪声中靠近  $f_c (f_c = 1/T_c)$  及其谐波频率  $n f_c (n$  取整数) 处的噪声下转换到钟信号内, 从而恶化信噪比, 降低频率稳定度。因此, 滤波函数  $|H_{\text{det}}(f)|^2$  只针对单点频率  $n f_c$  低通滤波, 即

$$|H_{\text{det}}(n f_c)|^2 = |[1 - \exp(-i2n\pi f_c t_d)] / (2n\pi f_c t_d)|^2, \quad (4)$$

且其带宽为  $1/(2t_d)$ 。图 3(b) 所示为在目前钟时序 (如图 2 所示) 下的滤波函数  $|H_{\text{det}}(f)|^2$ 。

记录的钟信号在时域上为不考虑探测窗口时的冷原子吸收光强  $I_a$  与探测窗口  $h(t)$  的卷积, 因此, 由探测光强度噪声引起的归一化吸收信号起伏在频域上可以写成

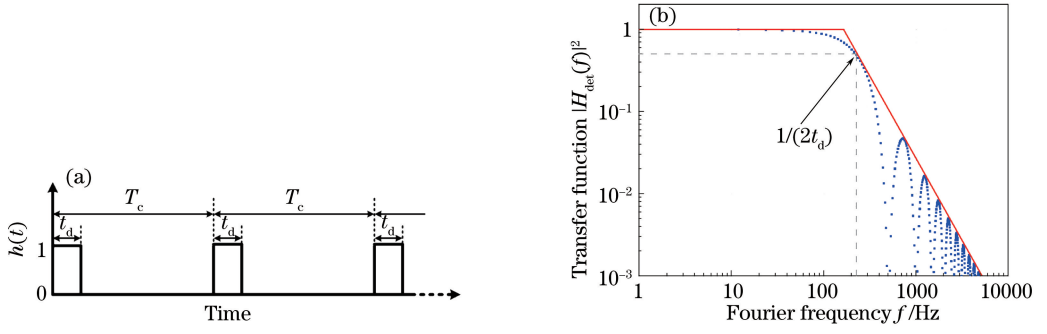


图 3 (a)探测窗口在时域上的传递函数;(b)目前时序(如图 2 所示)下探测窗口在频域上的滤波函数

Fig. 3 (a) Transfer function of detection window in time domain; (b) filter function of detection window in frequency domain at present time sequence (in Fig.2)

$$\sigma_{AM}^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |H_{det}(nf_c)|^2 S_{\delta I_a/I_a}(f) df, \quad (5)$$

式中  $\sigma_{AM}$  为归一化的钟信号起伏的标准方差,  $S_{\delta I_a/I_a}(f)$  为吸收光强的相对强度噪声功率谱密度。其中,  $S_{\delta I_a/I_a}(f)$  的来源主要有两个, 即探测光强度和频率噪声分别引起的吸收光强度噪声  $S_{\delta I_a/I_a}^{AM-AM}(f)$  和  $S_{\delta I_a/I_a}^{PM-AM}(f)$ 。  $\sigma_{AM}^2$  与原子钟的频率稳定度的关系<sup>[13]</sup>为

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{C} \frac{\sigma_{AM}}{Q_a} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}, \quad (6)$$

式中  $C=1$  为对比度,  $Q_a=3.4 \times 10^8$  为原子的品质因数,  $\tau$  为积分时间。

### 3 实验结果与分析

在闭环过程中, 探测光按照机械开关在光路上规定的时序进入物理系统探测冷原子。在实验中发现, 探测光机械开关表面反射的杂散光恶化了功率稳定环路内的监测光。为了解决这个问题, 在探测光机械开关表面喷涂了一种对入射光具有吸收作用的黑色特殊涂料, 以去除机械开关表面的杂散光。该涂料由球形颜料组成, 可吸收任意角度的入射光, 吸收率高达 98%; 其形成一定厚度后, 具有耐热、抗冷凝、光学性能稳定等优点。

机械开关表面的杂散光被去除掉后, 在机械开关按照钟时序运行时的高频处, 功率稳定环路内监测光的相对强度噪声  $S_{\delta I_0/I_0}^{mon}(f)$  最大被压缩了 15 dB, 如图 4 所示。因此可以推断, 在机械开关按照钟时序运行时, 环路外的探测光强度噪声在杂散光被去除掉后同样也被压缩了 15 dB。

此外, 去除杂散光后, 在机械开关按照钟时序运行时, 环路内监测光的相对强度噪声与其完全打开时的水平一样, 故可以将机械开关完全打开时测量得到的环路外探测光强度噪声(如图 5 所示)等价成机械开关

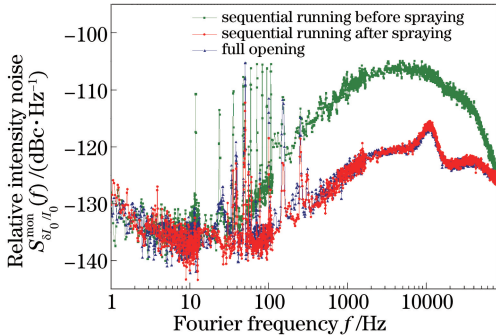


图 4 环路内监测光的相对强度噪声功率谱密度  
Fig. 4 Power spectral density of relative intensity noise from monitor laser in loop

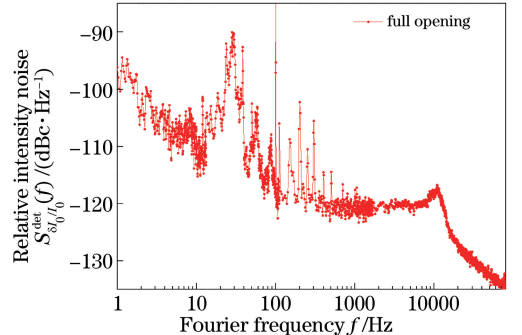


图 5 环路外探测光相对强度噪声的功率谱密度  
Fig. 5 Power spectral density of relative intensity noise from probe laser out of loop

按照钟时序运行时的环路外探测光强度噪声  $S_{\delta I_0/I_0}^{\text{det}}(f)$ 。由(1)式可直接得到,探测光强度噪声引起的吸收光强度噪声为

$$S_{\delta I_a/I_a}^{\text{AM-AM}} = S_{\delta I_0/I_0}^{\text{det}}(f). \quad (7)$$

结合(5)式得到,探测光强度噪声引起的钟信号起伏为  $\sigma_{\text{AM}}^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |H_{\text{det}}(nf_c)|^2 S_{\delta I_a/I_a}^{\text{AM-AM}} df$ 。再经过(6)式计算后发现,采用功率稳定和杂散光去除的方法,探测光强度的噪声被压缩了 15 dB,且使探测光强度噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响  $\sigma^{\text{AM-AM}}(\tau)$  被降低至  $9\tau^{-1/2} \times 10^{-15}$ 。

ISCAC 利用漫反射激光间歇式地制备冷原子,在实验上不能连续和直接测量频率噪声引起的吸收光强度起伏。但是,因为 ISCAC 使用近共振的探测光探测钟信号,所以可根据(2)式中吸收截面对频率变化的敏感性,估算频率噪声引起的吸收光强度起伏。

探测光频率稳定度的测量结果如图 6 所示。在积分时间 1 s 处,探测光的频率稳定度  $\sigma_{\text{laser}}(\tau) = 3.87\tau^{-1/2} \times 10^{-11}$ 。Bize<sup>[1]</sup>认为,探测光短期频率稳定度的贡献主要来源于白频率噪声。故根据激光器积分时间 1 s 时的频率稳定度  $\sigma_{\text{laser}}(\tau=1 \text{ s})$ ,估算出探测光的白频率噪声约为  $3 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1}$ 。

探测光由一台窄线宽激光器提供,考虑探测光频率近共振时,其频率在激光器输出频率的半高宽处。根据(2)式,吸收截面  $\sigma$  对探测光失谐量  $\Delta$  的敏感度为  $(d\sigma/\sigma_0)/d\Delta = (-8\Delta/\Gamma^2)/[(2\Delta/\Gamma)^2 + 1]$ ,由探测光频率噪声引起的吸收光强度噪声  $S_{\delta I_a/I_a}^{\text{PM-AM}}(f)$  可表示为

$$S_{\delta I_a/I_a}^{\text{PM-AM}}(f) = \left(\frac{\omega_{\text{laser}}}{15\Gamma}\right)^2 S(f), \quad (8)$$

式中  $\omega_{\text{laser}}$  为探测光频率, $S(f)$  为功率谱密度。结合(5)式,得到探测光频率噪声引起的钟信号起伏为

$\sigma_{\text{PM}}^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |H_{\text{det}}(nf_c)|^2 S_{\delta I_a/I_a}^{\text{PM-AM}}(f) df$ 。在目前钟时序(如图 2 所示)下,探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响  $\sigma^{\text{PM-AM}}(\tau)$  达到了  $2.5\tau^{-1/2} \times 10^{-13}$ 。

为了进一步研究探测光的频率噪声,探究了  $\sigma^{\text{PM-AM}}(\tau)$  与探测时间  $t_d$  的关系,结果如图 7 所示。可以发现,当钟周期一定时,探测时间越长,探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响越小。这是因为钟信号是吸收光强的平均值,探测时间越长,平均效果就越明显,带宽就越窄,对频率稳定度有贡献的噪声成分就越少。基于此,提出了一种降低探测光频率噪声影响的实验方案,即在钟周期一定时增大探测时间。在不影响 Ramsey 条纹信噪比和线宽的情况下,实验中可以将探测时间增大至 12 ms,使得探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响减小到  $9.4\tau^{-1/2} \times 10^{-14}$ 。结合该实验方案,下一步将采用探测光激光器外调制的方法或利用全光纤环形谐振器<sup>[14]</sup>,以进一步降低探测光频率噪声的影响。

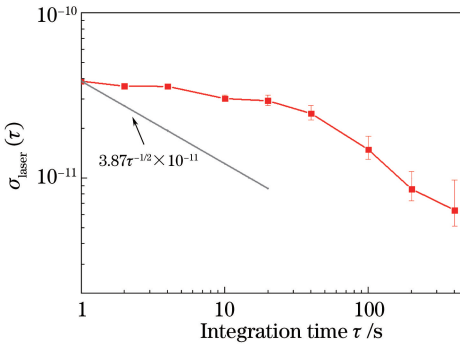


图 6 探测光频率稳定度

Fig. 6 Frequency stability of probe laser

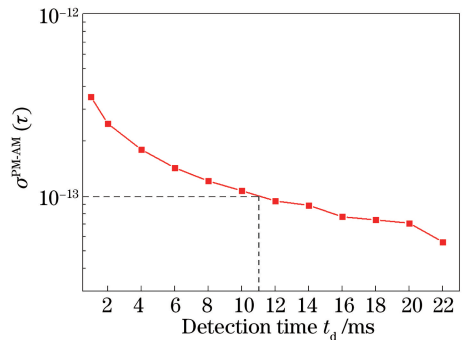


图 7  $\sigma^{\text{PM-AM}}(\tau)$  与探测时间  $t_d$  间的关系

Fig. 7  $\sigma^{\text{PM-AM}}(\tau)$  versus detection time  $t_d$

## 4 结 论

对 ISCAC 探测光的频率和强度噪声进行了理论分析和实验研究。利用稳定探测光功率和去除杂散光的方法,压缩了探测光的强度噪声,使探测光强度噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响降低至  $9\tau^{-1/2} \times 10^{-15}$ 。



理论分析了探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度的影响,根据分析结果,提出了一种降低探测光频率噪声对 ISCAC 频率稳定度影响的实验方案,即在钟周期、Ramsey 条纹信噪比及线宽不变的情况下,增加钟信号探测时间至 12 ms 时,可将探测光频率噪声的影响降低至  $9.4\tau^{-1/2} \times 10^{-14}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Bize S. Tests fondamentaux à l'aide d'horloges à atomes froids de rubidium et de césium (in French)[D]. Paris: University Paris, 2001: 140-147.
- [2] Tremine S, Guerandel S, Holleville D, *et al.* Limitations to the short term frequency stability in a compact cold atom clock[C]. Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005: 111-116.
- [3] Leveque T, Faure B, Esnault F X, *et al.* PHARAO laser source flight model: Design and performances[J]. Rev Sci Instrum, 2015, 86(3): 033104.
- [4] 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.
- [5] Yabuzaki T, Mitsui T, Tanaka U. New type of high-resolution spectroscopy with a diode laser[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(18): 2453-2456.
- [6] Kang S, Gharavipour M, Affolderbach C, *et al.* Stability limitations from optical detection in Ramsey-type vapour-cell atomic clocks[J]. Electron Lett, 2015, 51(20): 1767-1769.
- [7] Meng Yanling, Gao Yuanci, Zheng Benchang, *et al.* Design for the integration of integrating sphere and microwave cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0918001.  
孟艳玲, 高源慈, 郑本昌, 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.
- [8] Liu Peng, Cheng Huadong, Meng Yanling, *et al.* Research on phase modulation of Ramsey fringes in integrating sphere cold atom clocks[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1112001.  
刘 鹏, 成华东, 孟艳玲, 等. 积分球冷原子钟相位调制 Ramsey 条纹研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1112001.
- [9] Meng Yanling, Cheng Huadong, Zheng Benchang, *et al.* Controlling the shape of a cold atom cloud in a cylindrical cavity[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(6): 063701.
- [10] Li Lin, Liu Peng, Ji Jingwei, *et al.* Probe laser power stabilization for integrated sphere cold atom clock[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0814004.  
李 琳, 刘 鹏, 吉经纬, 等. 积分球冷原子钟探测光功率自动稳定实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0814004.
- [11] Wang Xucheng, Cheng Huadong, Xiao Ling, *et al.* A new approach to measure temperature of large-scaled cold atomic cloud[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 10(8): 0802001.  
王旭成, 成华东, 肖 玲, 等. 一种新的测量大尺度冷原子团温度的方法[J]. 光学学报, 2012, 10(8): 0802001.
- [12] McDonald G D. Detecting atomic shot noise on ultracold atom clouds[D]. Canberra: Australian National University, 2009: 11-14.
- [13] Riehle F. Frequency standards: Basics and applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 58-59.
- [14] Hu Yongqi, Dong Jing, Huang Junchao, *et al.* Frequency noise suppression of single-frequency laser by all-fiber ring resonator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802012.  
胡永奇, 董 靖, 黄军超, 等. 利用全光纤环形谐振器实现对单频激光器频率噪声的抑制[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802012.