

锶原子互组跃迁荧光探测系统的研制

丛东亮^{1,2} 王叶兵^{1,2} 许朋¹ 常宏¹

(¹ 中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室量子频标室, 陕西 西安 710600)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 锶原子单态和三重态间的互组跃迁($5s^2$)¹S₀-($5s5p$)³P₁ 辐射率远小于一般的电偶极跃迁, 共振跃迁荧光信号微弱。介绍了一种应用于探测该互组跃迁荧光谱的直流偏置探测器。该探测器选用极低输入偏置电流运算放大器作为前置放大, 具有信噪比高、增益高、偏置可调等优点。此探测器探测增益为 10⁶ V/W 量级, -3 dB 带宽为 1 MHz。实验中利用该探测器对锶原子互组跃迁($5s^2$)¹S₀-($5s5p$)³P₁ 微弱共振荧光进行探测, 获得信噪比很好的共振荧光谱, 且无直流偏置, 并由此获得高信噪比的鉴频曲线。应用该探测器观测到了饱和荧光谱线以及对应的鉴频曲线, 可用于 689 nm 激光锁频, 应用于锶光钟系统。

关键词 探测器; 量子光学; 互组跃迁; 原子分子光谱

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0704001

Bias Detector Used for Fluorescence Spectrum of Strontium Intercombination Transition

Cong Dongliang^{1,2} Wang Yebing^{1,2} Xu Peng¹ Chang Hong¹

¹ *Laboratory of Quantum Frequency Standard,*

*Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards of Chinese Academy of Sciences,
National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710060, China*

² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The rate of spontaneous emission of strontium intercombination transition between singlet state and triplet state ($5s^2$)¹S₀-($5s5p$)³P₁ is less than the rate of electric dipole transition. Compared with the dipole transition, the fluorescent signal of intercombination transition is very weak. A bias detector is reported which is used to detect the fluorescent signal of this intercombination transition. An ultralow input bias current operational amplifier is applied in this detector to pre-amplify the weak signal, which makes the signal have high signal-to-noise ratio (SNR) and high gain. The detector's bias can be adjusted. Its gain is on the order of 10⁶ V/W and -3 dB bandwidth is about 1 MHz. According to our experiment, the weak sympathetic fluorescent signal of ($5s^2$)¹S₀-($5s5p$)³P₁ intercombination transition is detected by the detector. Consequently, we obtain the fluorescent signal with high SNR and zero bias. Also we detect the high-SNR error signal of the fluorescent signal. Besides, saturated fluorescence spectrum and its error signal are also acquired by the detector. These signals can satisfy the requirement of 689 nm laser frequency stabilization and then be used for strontium optical clock.

Key words detectors; quantum optics; intercombination transition; atomic and molecular spectroscopy

OCIS codes 040.5160; 300.2530; 300.6210

1 引 言

相对于最外层是单电子的碱金属, 碱土金属原子

最外层具有两个价电子, 能级结构更加复杂, 有更丰富的物理内容和多方面的应用前景, 相应地在研究上

收稿日期: 2012-01-16; **收到修改稿日期**: 2012-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(11074252)、中国科学院百人计划基金(O916YC1101)和陕西省自然科学基金(Y112KF1101)资助课题。

作者简介: 丛东亮(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光频标方面的研究。E-mail: congdongliangcg@163.com

导师简介: 常宏(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事量子光学及光频标等方面的研究。

E-mail: changhong@ntsc.ac.cn(通信联系人)

需要更复杂的技术手段。碱土金属原子两个价电子会产生两套能级结构,单态($S=0$)和三重态($S=1$),依照电偶极跃迁选择定则,单态和三重态之间的跃迁是禁戒的。但随着原子量的增加、自旋轨道耦合以及其他的相对论的修正, 1P_1 和 3P_1 态之间的自旋轨道相互作用已经可以和态间的库仑能量差相比拟,导致单态和三重态出现混合,增加了跃迁的概率,理论上的禁阻跃迁变为了局部允许的互组跃迁^[1]。碱土金属中的互组跃迁辐射率小,线宽窄^[2],在光与原子相互作用的实验中有着重要的应用,如玻色-爱因斯坦凝聚^[3,4]、费米简并^[5],特别是近年来广泛引起人们关注的光频标^[6~10]。

对于中性锶原子($5s^2$) 1S_0 - $(5s5p)^3P_1$ 互组跃迁,其线宽约为7.6 kHz,在锶光晶格钟研制过程中应用此跃迁可以将锶原子温度由毫开量级冷却到微开量级^[2]。由于互组跃迁辐射率小,较电偶极跃迁低几个量级,跃迁荧光谱很微弱,所以在实验中需要能够探测微弱荧光的探测系统。本文研制了一种高信噪比、高增益、偏置可调的荧光探测器,能够很好地对互组跃迁荧光谱线进行探测,获得较理想的谱线信号并利用该谱线完成对689 nm激光频率的锁定,用于锶光晶格钟实验系统。

2 锶原子单态和三重态间的互组跃迁

锶是第5周期IIA族的碱土金属元素,原子序数38,最外层有两个价电子,原子具有单态($S=0$)和三重态($S=1$)的两组能级结构。锶原子简单能级结构如图1所示。在非相对论情况下,原子的跃迁大多数是偶极跃迁,服从偶极选择定则,例如锶原子的 $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^1P_1$ 能级跃迁。而锶原子单态和三重态之间的 $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^3P_1$ 跃迁属于互组跃迁。按照电偶极跃迁选择定则,此跃迁是禁戒的。但其原子量较大,由于自旋轨道耦合以及其他的相对论的修正, 1P_1 和 3P_1 态之间的自旋轨道相互作用已经可以和态间的库仑能量差相比拟,导致单态和三重态出现混合,增加了跃迁的概率。对于锶原子,即有少量的 1P_1 态混合到了 3P_1 态, $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^3P_1$ 可以进行弱的偶极跃迁^[1,11]。锶原子的 $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^1P_1$ 能级跃迁自然线宽为32 MHz,能级寿命为5 ns,多普勒冷却极限为770 μ K。锶原子的 $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^3P_1$ 互组跃迁的线宽窄、寿命长、多普勒冷却温度极限低,其自然线宽为7.6 kHz,能级寿命为21 μ s,多普勒冷却极限为180 nK^[12]。

锶原子单态和三重态间的互组跃迁与单态间的

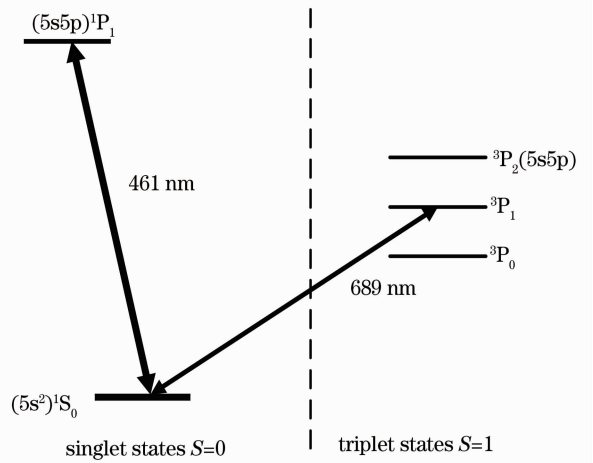


图1 锶原子冷却的相关能级结构图

Fig. 1 Energy-level structure of strontium for laser cooling

偶极跃迁相比,在与对应激光场共振时所发出的荧光强度有很大差别。单原子对光子散射率为

$$R = \frac{I}{I_s} \frac{\gamma}{2} \frac{1}{1 + \frac{I}{I_s} + \left(\frac{2\Delta}{\gamma}\right)^2}, \quad (1)$$

式中 γ 为原子能级间自发辐射线宽, I 是与原子相互作用的激光强度, I_s 为饱和光强, Δ 为激光相对于其能级跃迁频率失谐。 $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^1P_1$ 能级跃迁对应461 nm饱和光强是43 mW/cm², $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^3P_1$ 能级跃迁对应689 nm饱和光强为3 μ W/cm²^[12]。由(1)式可以看出689 nm激光比461 nm激光诱导的散射光子数少得多。偶极跃迁每个原子每秒辐射出 10^8 量级的光子,而互组跃迁每个原子每秒只辐射出 10^3 量级的光子^[13],所以锶原子互组跃迁 $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^3P_1$ 的共振荧光比单态间 $(5s^2)^1S_0$ - $(5s5p)^1P_1$ 跃迁要弱得多,实验上需要更高效灵敏的探测系统。

激光与原子束相互作用发出的荧光强度,在半经典理论下,表达式为^[14,15]

$$I_F = \alpha\beta \frac{\theta}{4\pi S_s} N\hbar\omega_0 R, \quad (2)$$

式中 N 为原子数目, $\hbar\omega_0$ 为单个光子能量, ω_0 为原子辐射频率, θ 为探测立体角, S_s 是探测器表面积, α 为实际探测到的功率与入射到探测器表面的功率比例因子, β 是荧光收集系统收集效率。对于锶原子光钟实验系统^[14,15],荧光收集系统为双透镜($f=50$ mm)的组合,探测的立体角为 $\pi/2$,估算出689 nm激光与锶原子相互作用辐射的荧光强度约为100 nW/cm²量级,光电转换后的电流约为10 nA量级,这给探测器

提出了相当高的要求。一般常用直流偏置探测器(如 THORLABS 公司生产的 FPD510 系列探测器),增益在 10^4 V/W 量级,无法满足实验要求。虽然商用大面积探测器增益在 10^6 V/W 量级,但其带宽在 1 MHz 以下,且价格较高。通过选用极低输入偏置电流运算放大器,设计出了一种低噪声、高增益、偏置可调的荧光探测器,采集互组跃迁的荧光谱线,应用于激光锁频系统。

3 探测器设计

铯原子 $(5s^2)^1S_0-(5s5p)^3P_1$ 互组跃迁很微弱,其自发辐射率比一般的偶极跃迁低 4 个量级。在探测荧光信号的过程中,周围杂散光对谱线有较大的影响,会有一个较大的信号偏置基底。为了便于激光锁频,需要把探测输出信号中的基底偏置去掉,同时探测器的设计需要考虑低噪声和高增益。

图 2 为电流-电压转换电路原理图^[16],PD 为光电二极管, R_s 为取样电阻。对于微弱信号探测而言,需要一个比较大的取样电阻。但这样取样电阻会产生热噪声,且电阻值越大,噪声也越大。由于光电探测器还会产生暗电流,光电探测器的 PN 结上的结电容 C 会和取样电阻 R_s 形成一个充电回路, $R_s C$ 值的大小决定光电探测器的响应速度。此电路的 -3 dB 频带宽度 f_c 可表示为

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_s R_s}, \quad (3)$$

式中 C_s 为光电探测器极间分布电容和电阻 R_s 的分布电容以及导线分布电容之和。利用图 2 电路直接制作探测器效果不佳。使用日本滨松公司生产的 S1337 系列光电二极管 S1337-1010BR,感光面积为 100 mm^2 ,暗电流最大为 200 pA ,对 689 nm 荧光的灵敏度为 0.44 A/W ,结电容为 1100 pF ,所用采样电阻为 $10 \text{ M}\Omega$ 时,增益也只能达到 10^4 V/W 量级,得到的荧光信号只有毫伏量级,此时电路的 -3 dB 频带宽度 f_c 只有 14 kHz 左右。为了得到更大的荧光信号,需要增大采样电阻,但这样会使得带宽更窄,对于调制锁频是十分不利的。采样电阻越大,响应时间越长,而且如果电阻很大,对于后级电路来说,相当于一个大的输出阻抗,这样要求后级电路有很大的输入阻抗,才能尽可能多地提取信号能量。

为了满足互组跃迁荧光探测和激光锁频的要求,需要选用低输入偏置电流、低噪声、低漂移和高输入阻抗的运放。输入偏置电流是输入级差放管的基极(栅极)偏置电流的平均值,偏置电流愈小,信号

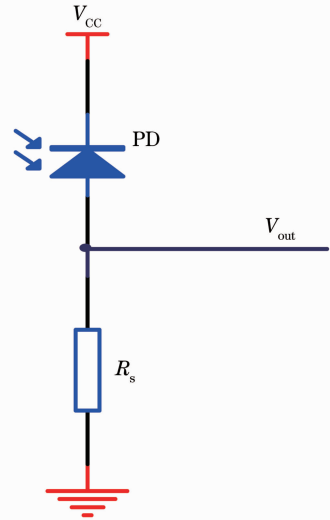


图 2 电流-电压转换电路

Fig. 2 Conversion circuit of current and voltage

源内阻对集成运放静态工作点的影响也就愈小。因为要精确测量纳安数量级范围的光电二极管电流,运算放大器的偏置电流不应大于数皮安,因此对运放的选择提出了极高的要求。作为常用探测器,采用低噪精密运算放大器(如 OP27)无法满足要求,这是因为对于低噪精密运算放大器而言输入偏置电流为几十纳安,几乎与光电二极管电流相当,不能应用于前置放大。使用极低输入偏置电流运算放大器 AD549 作为前级放大,此类型运算放大器输入偏置电流在几十飞安量级,对于 AD549 为 60 fA ,比常用低噪精密运算放大器低 6 个数量级。极低输入偏置电流运算放大器 AD549 与低噪精密运算放大器 OP27 的性能比较如表 1 所示。

表 1 AD549 与 OP27 性能

Table 1 Features of AD549 and OP27

	Ultralow input bias current operational amplifier AD549	Low-noise precision operational amplifier OP27
Input bias current (maximum)	60 fA	40 nA
Offset voltage (maximum)	0.25 mV	10 μV
Offset drift (maximum)	5 $\mu\text{V}/\text{C}$	0.2 $\mu\text{V}/\text{C}$
Input voltage noise p-p over 0.1~10 Hz	4 μV	80 nV

由表 1 可知,极低输入偏置电流运算放大器 AD549 与低噪精密运算放大器相比有极低的输入偏置电流,可以用于非常微弱电流的前置放大,但其峰峰(p-p)值噪声比低噪精密运算放大器 OP27 差,从而在电路设计、电路板制作、屏蔽外壳等方面要考

虑降低噪声^[17]。在探测器制作过程中,电源线远离信号线,避免走线间的干扰;走线尽量短,并适当敷铜;在必要的地方使用贴片元件;运放输入级周围敷设平行的低阻抗导线,该导线的电位固定为地

(0 V);在印制电路板电源输入端子和运算放大器电源引脚时,加入电容进行滤波;电源线和信号线包屏蔽层、电路板包金属外壳屏蔽外界干扰。

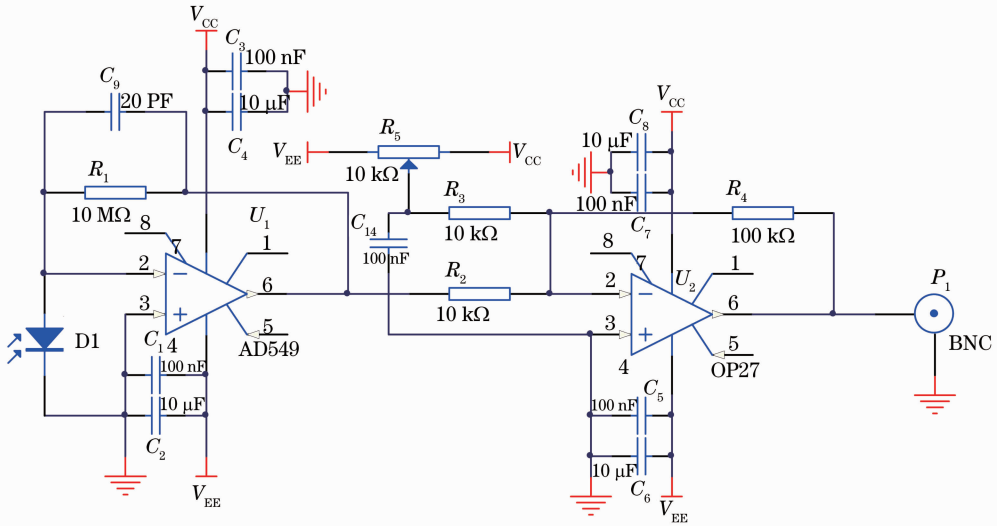


图3 以运算放大器 AD549 与光电二极管为基础的探测器

Fig. 3 Detector based on AD549 and photodiode

以极低输入偏置电流运算放大器和光电二极管作为前级采集,获得无偏置且幅度较大的电信号,AD549 的偏置电流可以达到飞安量级,可以很好地满足前级采集要求,电路设计如图3所示。输入电容和负载电容(还包括耦合电容和旁路电容)会导致相位滞后,使得电路振荡。采用超前补偿的方式,在反馈电阻 R_1 上加一个补偿电容 C_9 ,消除电路震荡^[16]。后级放大采用低噪声精密运算放大器 OP27,构成反相求和运算电路。电压参考和信号同时接到运放反相端。电压参考端是为了调零,使得

输出的信号无偏置。采用精密滑动变阻器作为参考,可调节输出信号的偏置,使得偏置为零。在变阻器输出端口加一个滤波电容以降低噪声。此探测器探测增益为 10^6 V/W 量级。电路中带宽主要由后级放大电路所决定,运算放大器 AD549 与 OP27 的开环频率响应曲线如图4所示^[18,19]。运放 OP27 的增益带宽积为 8 MHz,可知此电路-3 dB 带宽约为 1 MHz;输入电压噪声峰峰值是 80 nV,因此在电路中运放 OP27 理论输出噪声峰峰值为 $0.8 \mu\text{V}$ 。此电路噪声较小,带宽较大,有利于调制锁频。

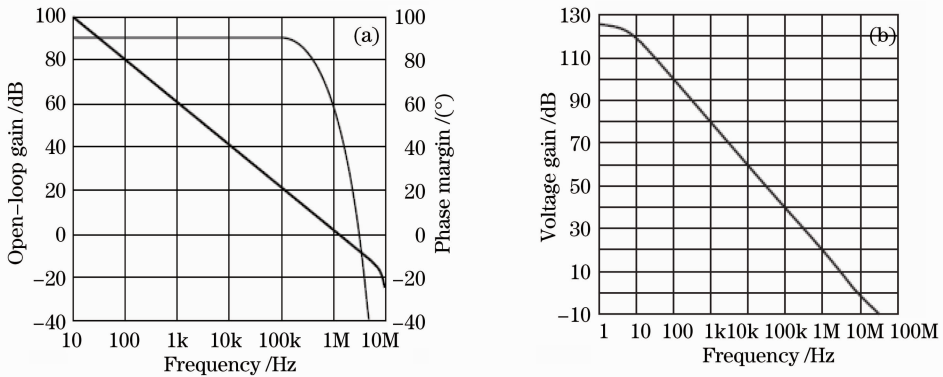


图4 运算放大器(a)AD549 和(b)OP27 的开环频率响应曲线

Fig. 4 Open-loop frequency response of operational amplifiers (a) AD549 and (b) OP27

4 实验结果与分析

实验中进行铯原子荧光探测的装置如文献[20]

所述。利用图3电路设计的探测器观测了铯原子 $(5s^2)^1S_0-(5s5p)^3P_1$ 互组跃迁的微弱共振荧光谱以

及对应的鉴频曲线,并与依据基本采样电路设计的探测器进行比较。

依据图 2 电路所设计的探测器,得到的荧光信号如图 5(a)所示。图 5(b)所示曲线是依据图 3 电路所设计的探测器测量的结果。图 5(a)中,荧光谱线的峰值差异是由于铯原子同位素的自然丰度不同造成的,其最高峰值对应的是 ^{88}Sr 的跃迁谱线,次高峰值对应的是 ^{86}Sr 的跃迁谱线,由于 ^{88}Sr 和 ^{86}Sr 都是玻色子,没有超精细结构,所以都是单一峰;较小的峰是费米子 ^{87}Sr 的超精细能级跃迁之间的三个谱线之一,其他两个峰因为激光器扫描范围小,未能显示出来。 ^{86}Sr 与 ^{88}Sr 的同位素位移为 -163.8 MHz ,图中 ^{87}Sr 对应的超精细能级跃迁与 ^{88}Sr 的同位素位

移为 221.7 MHz 。在此图中, ^{88}Sr 对应荧光峰较小,为 6 mV 左右,且是加载在 200 mV 左右的直流基底上面的,所以给锁频带来了一定困难。根据(3)式,可以计算出此探测器的带宽约为 14 kHz ;依据荧光强度和对应荧光峰值可以得到其增益为 $6 \times 10^4\text{ V/W}$ 。从图 5(b)可见,此探测器测得荧光的信噪比好,且 ^{88}Sr 对应峰峰值约 640 mV ,无直流基底。 ^{88}Sr 荧光峰线宽约为 56 MHz ,远大于其自然线宽,这是由原子束具有一定发散角导致的横向多普勒增宽、激光线宽、渡越增宽等因素共同作用造成的,其中横向多普勒增宽是主要因素^[20]。由(3)式可知,此探测器带宽约为 1 MHz ;其增益为 $6.4 \times 10^6\text{ V/W}$ 。

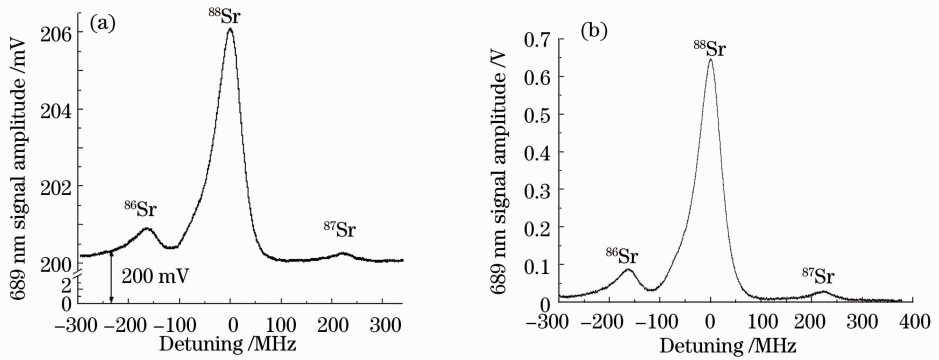


图 5 (a) 依据图 2 电路所设计的探测器获得的荧光信号; (b) 依据图 3 电路所设计的探测器获得的荧光信号

Fig. 5 Fluorescent signals detected by detectors based on (a) Fig. 2 circuit and (b) Fig. 3 circuit

由图 5 可知,利用极低输入偏置电流运算放大器 AD549 作为前置放大所设计的探测器有很好的信噪比,且在 689 nm 处增益很大,约为 10^6 V/W 量级。该探测器可以很好地应用于 689 nm 激光的锁频系统。

图 6、7 分别是依据图 2、3 电路所设计的探测器利用 Toptica 公司生产的 LIR 100 锁频系统所得的

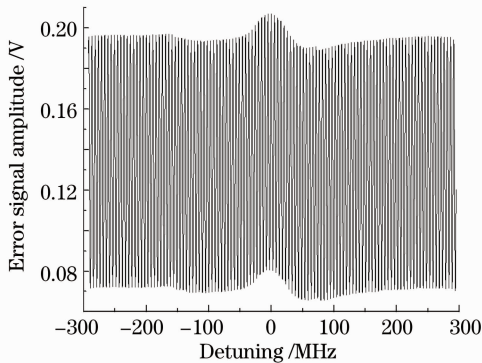


图 6 依据图 2 电路所设计的探测器获得的误差信号

Fig. 6 Error signal obtained by detector based on

Fig. 2 circuit

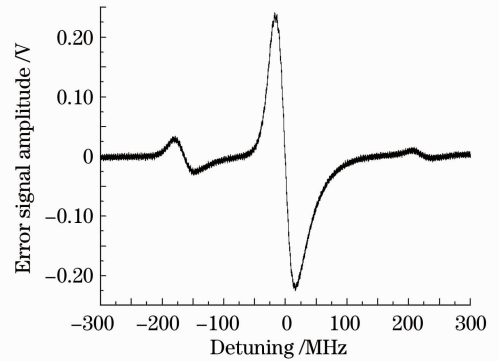


图 7 依据图 3 电路所设计的探测器获得的误差信号

Fig. 7 Error signal obtained by detector based on

Fig. 3 circuit

误差信号。可见利用极低输入偏置电流运算放大器 AD549 作为前置放大的探测器会得到很好的鉴频曲线,而依据基本采样电路设计的探测器所得到的误差信号中有一个很大的调制信号,这是由于荧光信号较小、偏置较大所造成的。

对于调制电流锁频,在原激光频率 ω_0 的基础上,加上 $\Delta\omega$ 的小幅度调制,然后比较 $\omega_0 + \Delta\omega$ 和 $\omega_0 -$

$\Delta\omega$ 的信号,来判断信号处于上升沿还是下降沿,然后得到鉴频信号,反馈控制压电陶瓷(PZT)的电压和激光二极管驱动电流,最终锁定激光器^[21,22]。本

文所用锁频系统,鉴频信号只反馈到 PZT 电压。

在锁频系统中,信号 $S(t)$ 首先与调制信号 $\sin(\omega_{\text{mod}}t)$ 混频

$$S(t)\sin(\omega_{\text{mod}}t) = S_0\sin(\omega_{\text{mod}}t) + S'(\omega_0)\Delta\omega\sin(\omega_{\text{mod}}t)^2 = 1/2 \cdot S'(\omega_0)\Delta\omega + S_0\sin(\omega_{\text{mod}}t) - 1/2 \cdot S'(\omega_0)\Delta\omega\cos(2\omega_{\text{mod}}t), \quad (4)$$

式中 ω_0 为未调制的激光频率, $\Delta\omega$ 为调制幅度, ω_{mod} 为调制频率, S_0 为未调制的信号。

然后通过一个低通滤波器 F_{lp} , 输出 $I_{\text{output}}^{\text{error}}$ 即是鉴频信号

$$I_{\text{output}}^{\text{error}} = F_{\text{lp}}[S(t)\sin(\omega_{\text{mod}} \cdot t)] = 1/2 \cdot S'(\omega_0)\Delta\omega. \quad (5)$$

若信号 $S(t)$ 中有一个很大的直流偏置 S_{DC} , 那么混频信号中会出现直流偏置项 $S_{\text{DC}}\sin(\omega_{\text{mod}}t)$, 则滤波后的信号中就会增加直流偏置对应项

$$F_{\text{lp}}[S_{\text{DC}}\sin(\omega_{\text{mod}}t)], \quad (6)$$

因直流偏置 $S_{\text{DC}} \gg S(t)$ [$S(t)$ 不包含直流项], 使得低通滤波后的 $S_{\text{DC}}\sin(\omega_{\text{mod}}t)$ 仍可以和 $1/2 \cdot S'(\omega_0)\Delta\omega$ 相比拟, 如图 6 所示。虽然可以通过增大调制幅度 $\Delta\omega$ 和降低低通滤波的截止频率来减小直流偏置的影响, 得到较好的鉴频曲线, 但这种方法的作用还是有限的。

利用根据图 3 研制的可调偏置的探测器得到的鉴频曲线(图 7), 可以对 689 nm 激光器进行锁频。为了使激光器锁定后的线宽更窄, 还可以应用饱和和荧光谱线锁频。图 8 为依据图 3 电路所设计的探测器探测得到的饱和荧光信号, 线宽比荧光谱线更窄。⁸⁸Sr 饱和荧光峰线宽约为 2 MHz, 大于其自然线宽 7.6 kHz, 但小于图 5 中的荧光峰线宽 56 MHz, 可以

使激光器锁定后的线宽更窄。图 9 是其对应的鉴频曲线。运用锁频系统, 把 689 nm 激光器频率锁定到饱和和荧光峰上, 可应用于铯原子二级冷却。

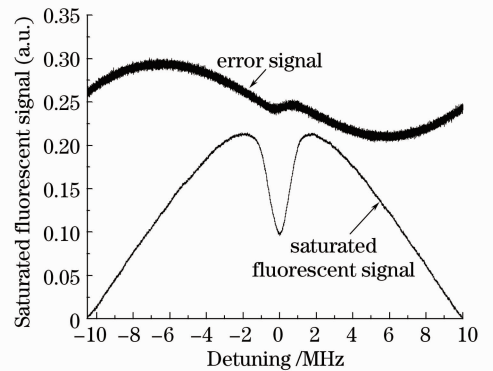


图 9 依据图 3 电路所设计的探测器获得的饱和和荧光信号以及对应的鉴频曲线

Fig. 9 Saturated fluorescent signal and its error signal obtained by detector based on Fig. 3 circuit

5 结 论

根据铯原子 $(5s^2)^1S_0 - (5s5p)^3P_1$ 互组跃迁的特点, 设计出了一种高信噪比、高增益、偏置可调的荧光谱探测系统, 用于观测互组跃迁的微弱荧光谱进而应用于对 689 nm 激光频率锁定。该探测器的性能可满足探测要求, 且很好地应用于铯原子互组跃迁的微弱荧光探测和激光锁频。

参 考 文 献

- 1 Alan Corney. Atomic and Laser Spectroscopy [M]. Oxford: Clarendon Press, 1977. 131~138
- 2 Xinye Xu, Thomas H. Loftus, John L. Hall *et al.*. Cooling and trapping of atomic strontium[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(5): 968~976
- 3 P. G. Mickelson, Y. N. Martinez de Escobar, M. Yan *et al.*. Bose-Einstein condensation of ⁸⁸Sr through sympathetic cooling with ⁸⁷Sr[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(5): 051601
- 4 Zhengwei Xie, Zexian Cao, E. I. Kats *et al.*. Nonlinear dynamics of a dipolar Bose-Einstein condensate in an optical lattice [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(2): 025601
- 5 B. J. DeSalvo, M. Yan, P. G. Mickelson *et al.*. Degenerate Fermi gas of ⁸⁷Sr[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**(3): 030402
- 6 Andrei Derevianko, Hidetoshi Katori. Colloquium: physics of optical lattice clocks [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, **83**(2):

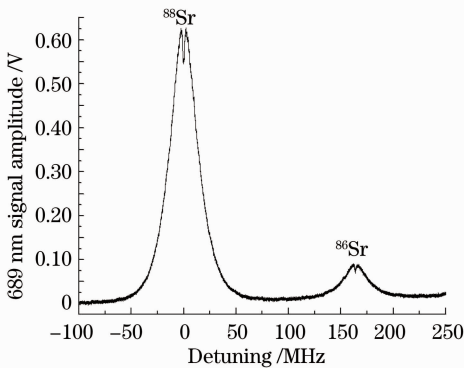


图 8 依据图 3 电路所设计的探测器获得的饱和和荧光信号

Fig. 8 Saturated fluorescent signal detected by detector based on Fig. 3 circuit

- 331~347
- 7 St. Falke, H. Schnatz, J. S. R. Vellore Winfried *et al.*. The ^{87}Sr optical frequency standard at PTB[J]. *Metrologia*, 2011, **48**(5): 399~407
- 8 Masao Takamoto, Fenglei Hong, Ryoichi Higashi *et al.*. An optical lattice clock[J]. *Nature*, 2005, **435**(7040): 321~324
- 9 Gao Kelin. Optical frequency standards based on trapped ions [J]. *Physics*, 2010, **39**(9): 604~611
高克林. 囚禁冷却离子光频标 [J]. *物理*, 2010, **39**(9): 604~611
- 10 Zhang Yuanyang, Fang Zhanjun, Zhang Zhigang. Design and construction of a Zeeman slower for Sr optical clock[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 935~939
张远洋, 方占军, 张志刚. 铯原子光晶格钟塞曼减速器的设计与实现[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 935~939
- 11 J. Migdalek, M. Stanek. The spin-allowed and spin-forbidden $5s^21S_0-5s5p^1P_1, ^3P_1$ transitions in strontium isoelectronic sequence[J]. *Z. Phys. D*, 1993, **27**(1): 9~15
- 12 Marco Schioppo. Development of a Transportable Strontium Optical Clock [D]. Florence: University of Florence, 2010. 37~40
- 13 Yenny Natali Martinez. Studies of the $5s^21S_0-5s5p^3P_1$ Transition in Atomic Strontium[D]. Houston: Rice University, 2008. 4~5
- 14 Tian Xiao, Chang Hong, Wang Xinliang *et al.*. Trapping four isotopes of strontium in a MOT by using Zeeman slowing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 898~902
田晓, 常宏, 王心亮等. 利用塞曼减速法实现铯同位素的磁光阱俘获[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 898~902
- 15 Tian Xiao. Realization of First-Stage Cooling of Strontium for the Optical Lattice Clock [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010. 42~45
田晓. 铯光晶格钟一级冷却的实现[D]. 北京: 中国科学院研
- 究生院, 2010. 42~45
- 16 Hu Tao, Si Hanying. Design and research of pre-amplifier circuit from a photo-electric detector [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, **25**(1): 52~55
胡涛, 司汉英. 光电探测器前置放大电路设计与研究[J]. *光电技术应用*, 2010, **25**(1): 52~55
- 17 Zhou Qianqian, Liu Jianli, Zhang Kuanshou. Low-noise broadband photo-detector designs in quantum optics [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2010, **16**(2): 152~157
周倩倩, 刘建丽, 张宽收. 量子光学实验中宽带低噪声光电探测器的研制[J]. *量子光学学报*, 2010, **16**(2): 152~157
- 18 Analog Devices, Inc.. Low-Noise, Precision Operational Amplifier: OP27 [DB/OL]. http://www.analog.com/static/improted-files/data_sheets/OP27.pdf, 2006. 10
- 19 Analog Devices, Inc.. Ultralow Input Bias Current Operational Amplifier: AD549 [DB/OL]. http://www.analog.com/static/improted-files/data_sheets/AD549.pdf, 2008. 3
- 20 Wang Yebing, Chen Jie, Tian Xiao *et al.*. Experimental investigation of spectroscopy of strontium intercombination transition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(2): 020601
王叶兵, 陈洁, 田晓等. 铯原子互组跃迁谱的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(2): 020601
- 21 Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong *et al.*. A laser diode system stabilized on the saturated absorption lines of rubidium atoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 197~201
张靖, 陶桦, 卫栋等. Rb原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 197~201
- 22 Jiang Xiao, Zhang Chen, Cai Wenqi *et al.*. Frequency stabilization system of diode laser for cold atom experiment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 82~86
江晓, 张晨, 蔡文奇等. 冷原子实验用的半导体激光器稳频系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 82~86

栏目编辑: 李文喆