

文章编号: 0253-2239(2003)02-0197-05

Rb 原子饱和吸收稳频半导体激光器系统^{*}

张 靖 陶 桦 卫 栋 董雅宾 耿 涛 王军民 彭 桦

(山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

摘要: 用饱和吸收光谱法对半导体激光器进行稳频, 通过对反馈回路的优化设计, 得到具有高信噪比的饱和吸收光谱微分误差信号, 从而大大提高了半导体激光器的频率锁定灵敏度及长期稳定性, 该系统可用于 Rb 原子的激光冷却与囚禁。

关键词: 半导体激光器; 饱和吸收光谱; 稳频; 信噪比

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

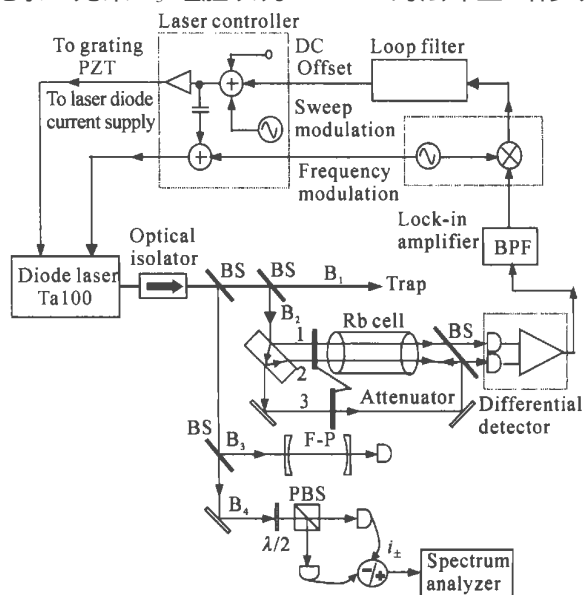
1 引 言

由于半导体激光器技术的迅猛发展和半导体激光器本身性能的不断改进, 使它在高分辨光谱、激光冷却与囚禁原子、新型量子频标等前沿科学研究方面有着广泛的用途^[1,2]。在这些领域应用中首先要要求半导体激光器窄线宽输出, 因此需要外部光学反馈技术来压窄激光线宽, 例如采用光栅外腔反馈方法可将半导体激光器线宽压窄到 100 kHz 量级上, 另外对激光频率的稳定性要求也很高, 通常输出激光的中心频率锁定在某个稳定度很高的参考频率上, 例如原子的某条吸收线、法布里-珀罗腔, 用以提高激光频率的稳定度。本文采用饱和吸收光谱技术将光栅外腔反馈窄线宽输出的半导体激光器的频率锁定到铷原子 D_2 线上, 通过对反馈回路中的电信号进行优化处理, 并将反馈信号同时加载到激光电流和反馈光栅的压电陶瓷上, 使半导体激光器的频率锁定灵敏度及长期稳定性都得到很大的提高, 该系统将用于 Rb 原子的激光冷却与囚禁。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。半导体激光器采用主振荡器-功率放大式单频半导体激光器 TA100(德国 TuiOptics), 它在 780 nm 处最大可输出 500 mW, 主振荡激光器是采用光栅外腔反馈稳定的半导体激光

器, 粗调光栅反馈的角度最大可达 7 nm 的调谐范围, 调节光栅上压电陶瓷的电压可连续调谐约 3 GHz, 调节激光二极管驱动电流可连续调谐 200 MHz, 但如果同时调节压电陶瓷的电压 (± 20 V) 和激光二极管驱动电流可连续调谐 10 GHz 而不跳模。激光输出首先经过光隔离器 (Isowave Model I-80T-5L) 防止光反馈影响激光器的模式。输出激光经分束器分为四束光, 光束 B_1 输出大部分的光功率用于 Rb 原子的激光冷却与囚禁。光束 B_4 经由 $\lambda/2$ 波片和偏振分束器及一对宽带低噪声探测器构成的平衡零拍探测系统来测量激光的强度噪声, 加减法器输出的光电流信号送入频谱分析仪(型号为 HP8890L)记录。光束 B_3 经腔长为 200 mm 的法布里-珀罗共



* 国家自然科学基金 (60178012) 和山西省自然及青年科学基金资助课题。

E-mail: jzhang74@y.ahoo.com

收稿日期: 2001-12-27; 收到修改稿日期: 2002-03-26

Fig. 1 Experimental setup for diode laser frequency stabilization. BPF: band pass filter; BS: beam splitter

焦腔来监视其模式并由示波器记录。光束 B_2 用于 Rb 原子的饱和吸收光谱。光束 B_2 又被一个厚为 12 mm 未镀膜的 K_9 玻璃基片分为三束, 基片表面反射率约为 4%, 光束 1 作为参考光, 光束 2 作为检测光, 光束 1 和光束 2 经衰减器调节其功率后约为 $30 \mu\text{W}$, 然后进入 30 mm 长的铷吸收泡, 通过一半透半反镜后分别由两只快速光电二极管 (Hamamatsu S3399) 探测。光束 3 功率约为 $400 \mu\text{W}$, 作为饱和光束进入铷吸收泡中与光束 2 空间重合, 但传播方向相反。

为了将激光器的频率锁定在铷原子的饱和吸收线上, 需在激光频率上加一 ω_f 的频率调制, 频率为 56 kHz 的正弦信号通过激光控制电路直接调制在激光驱动电流上, 带有饱和吸收信号的检测光以及参考光由一差分探测器探测, 差分探测器如图 2 所示, 两只快速光电二极管串接在一起, 两端接 $\pm 15 \text{ V}$ 的偏置电压, 这样可实现探测光和参考光的光电流直接相减, 运算放大器 A_1 为 I-V 转化器, 将相减的光电流信号转换为电压信号, 运算放大器 A_2 为电压跟随器, 用以监视检测光和参考光的强度是否一致。运算放大器 A_3 进一步放大信号, 然后交流耦合输出, 整个电路封装在金属盒内。这种探测器主要有两个优点, 一是可以有效地抑制半导体激光器输出的强度噪声, 使我们探测的光电信号接近于散粒噪声基准, 二是可以得到一个消去多普勒本底的饱和吸收信号以及由多普勒本底产生的微分误差信号。探测器输出的信号送入带通滤波器, 如图 3 所示, 首先是两极低通滤波, 它在高频处的转折频率 (-3 dB 处的频率) 为 $2\omega_f$, 接着是两极高通滤波, 它在低频处的转折频率 (-3 dB 处的频率) 为 $\omega_f/2$, 然后对信号进行放大, 补偿滤波对信号的衰减, 随后采用电感和电容串接对 $2\omega_f$ 进行陷波, 这样信号的信噪比会得到进一步的提高。经过带通滤波器输出的电信号

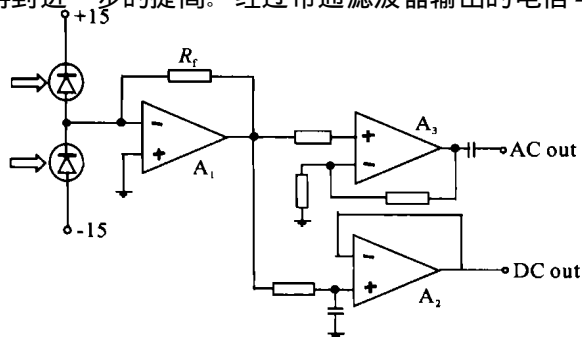


Fig. 2 Circuit schematic of the differential detector

送入锁相放大器 (Stanford Research Systems Model, SR830 DSP) 解调出稳频的微分误差信号, 锁相放大器内置一频率可调节的正弦波信号源 ($1 \text{ mHz} \sim 102 \text{ kHz}$), 我们选用的正弦频率调制信号 ω_f 为 56 kHz, 锁相放大器同时用内置的正弦波信号与输入的电信号混频获得反馈回路稳频的微分误差信号。然后微分误差信号送入一自制的微分误差信号滤波器, 它是利用比例积分微分 (PID) 电路设计, 将微分误差信号调整到合适的反馈增益和带宽。最后微分误差信号送入激光控制电路, 激光控制电路将反馈信号分为两路分别控制压电陶瓷的电压和激光二极管驱动电流, 这样可增大锁频范围和稳频精度, 微分误差信号、低频扫描信号以及直流偏置叠加后一路直接用于控制压电陶瓷, 另一路取交流部分与正弦频率调制信号叠加送入激光二极管驱动电流上。

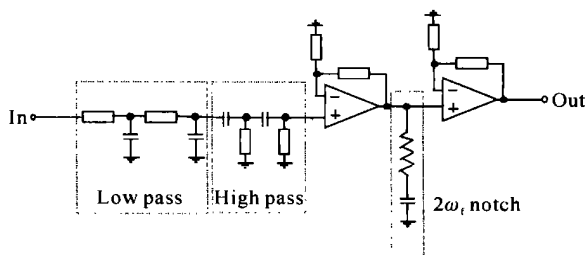


Fig. 3 Circuit schematic of the band pass filter

3 实验结果

光栅外腔反馈不仅可以压窄半导体激光器的线宽, 而且可抑制半导体激光器的强度噪声, 使之达到或低于散粒噪声基准^[3], 但激光经功率放大后必然引入噪声, 使放大后输出激光的强度噪声高于散粒噪声基准^[4]。我们将输出激光的一小部分光送入平衡零拍探测, 所测的强度噪声谱如图 4 所示, 获得的强度噪声谱与输出激光强度噪声和光束分束比有关, $V_{\text{Det}} = \epsilon V_{\text{laser}} + (1 - \epsilon)$, 其中 V_{Det} 为探测器探测到的归一化噪声功率, ϵ 为分束器的分束比。图 4 中曲线 1 为光电流和, 它就是分出一小部分光 (约 6 mW) 的强度噪声, 曲线 2 为光电流差, 这说明输出激光的强度噪声高于散粒噪声基准, 特别是低频端强度噪声更大。在铷吸收泡中含有两种同位素⁸⁷Rb 和⁸⁵Rb, 其 D_2 线能级的超精细结构如图 5 所示。

扫描调制信号源产生频率为 30 Hz 的斜波电压信号对激光的频率进行慢扫描, 参考光被挡掉, 差分探测器只探测检测光, 探测器输出送入示波器, 我们获得铷的两种同位素 D_2 线四条多普勒加宽的吸收

背景以及基于背景之上的多个无多普勒饱和吸收峰,如图 6 所示,同时图中给出法布里-珀罗共焦腔的透射曲线。铷原子 D_2 线的多普勒加宽约为 500 MHz,它们之间的间距可由法布里-珀罗共焦腔的透射曲线测量获得。

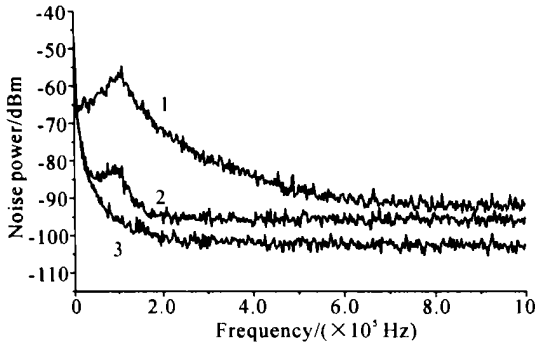


Fig. 4 Intensity noise spectrum of the diode laser. 1 is the noise of diode laser (i_+), 2 is noise spectrum of the difference of photocurrent i_+ , 3 is the electronic noise. The detected photocurrent is 3.6 mA

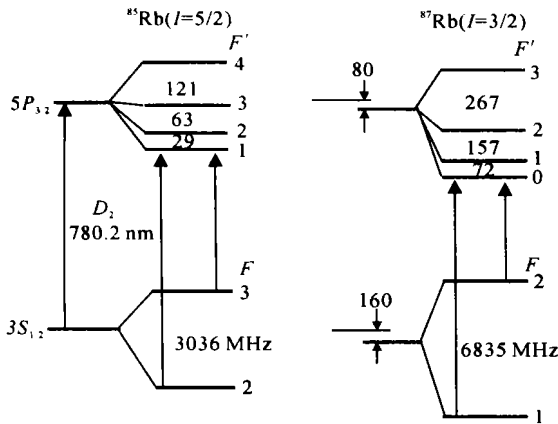


Fig. 5 Hyperfine level of Rb D_2 line

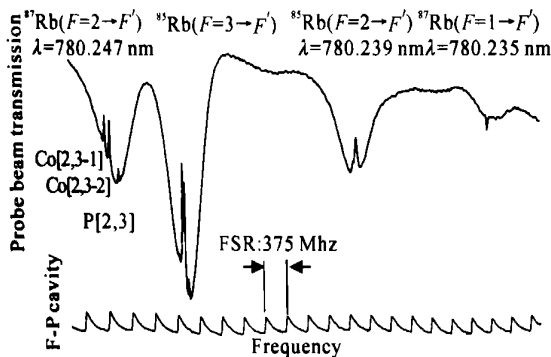


Fig. 6 Upper trace: saturation spectrum of Rb at 780 nm. Lower trace, transmission from a Fabry-Perot cavity. FSR: free spectrum range

挡掉抽运光,再观测参考光对差分探测器输出噪声谱的影响,结果如图 7 所示,曲线 1 为仅探测检

测光,而曲线 2 为同时探测检测光和参考光,从图中看出,采用差分探测方式可以抑制激光器本身的强度噪声来提高信噪比,并且可以有效抑制由多普勒吸收背景将频率调制转换为振幅调制的信号(56 kHz 的调制信号降低约 30 dB)。此外让抽运光通过铷吸收泡,我们通过观测锁相放大器的输出来分析差分探测器的优点。如图 8 所示,上面一条曲线为挡掉参考光时的微分误差信号,可以看到超精细结构的微分误差信号叠加在多普勒背景微分误差信号上,下面一条曲线为同时探测检测光和参考光时的微分误差信号,多普勒背景产生的微分误差信号被消除。

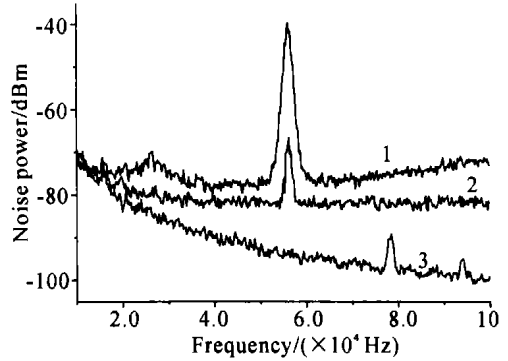


Fig. 7 Output intensity noise spectrum of the differential detector. 1 is the noise spectrum for only detecting probe beam, 2 is noise spectrum for detecting probe beam and reference beam, 3 is the electronic noise. Pump beam is blocked

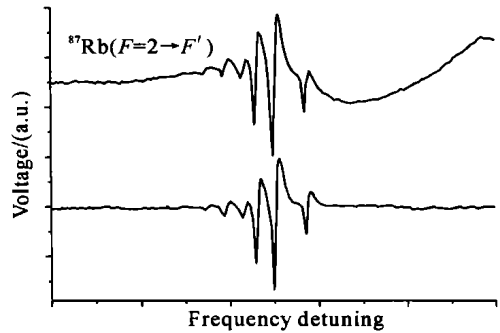


Fig. 8 Upper trace: error signal without reference beam. Lower trace: error signal with reference beam

适当调节扫描信号的幅度和直流偏置电压,可以分别得到 ^{87}Rb 能级的超精细结构: $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ [图 9(a)] 和 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ [图 9(d)] 以及 $^{85}\text{Rb}: 5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ [图 9(b)] 和 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ [图 9(c)], 图中同时给出无多普勒饱和吸收峰以及所对应的微分误差信号。

在饱和吸收谱中我们可以看到每个基态精细能级向上能级跃迁时,除了有 $F \rightarrow F' = F - 1, F, F + 1$ 的三个无多普勒饱和吸收峰外,还有 F 到 F' 能级间较强的交叉峰,它对应着激光频率调谐到两个饱和

吸收峰之间,这是由于抽运光和检测光与具有一定速度的原子相互作用,通过同一基态能级向不同精细能级跃迁的结果。同时我们注意到 ^{87}Rb : $F=1 \rightarrow F'$ 的交叉峰 CO 0-1 和 ^{85}Rb : $F=2 \rightarrow F'$ 的交叉峰 CO 1-2 为吸收增强,这是由于抽运光使原子在基态塞曼子能级重新布居的结果^[5],在考虑塞曼能级跃迁时,必须考虑光的偏振方向,我们实验中抽运光和检测光为相互平行的线偏振光。在抽运光路上加一 $\lambda/2$

波片,使抽运光的偏振方向与检测光垂直,我们可以看到 ^{85}Rb : $F=2 \rightarrow F'=1$ 和 $F=2 \rightarrow F'$ 的交叉峰 CO 1-2 发生反向, ^{87}Rb : $F=1 \rightarrow F'=0$ 和 $F=1 \rightarrow F'$ 的交叉峰 CO 0-1 也发生类似情况,如图 10 所示,图中曲线 1 对应的线偏振光相互垂直,曲线 2 对应的线偏振光相互平行。这里我们只对 ^{85}Rb : $F=2 \rightarrow F'=1$ 跃迁作简要的分析,其它情况可进行类似分析。

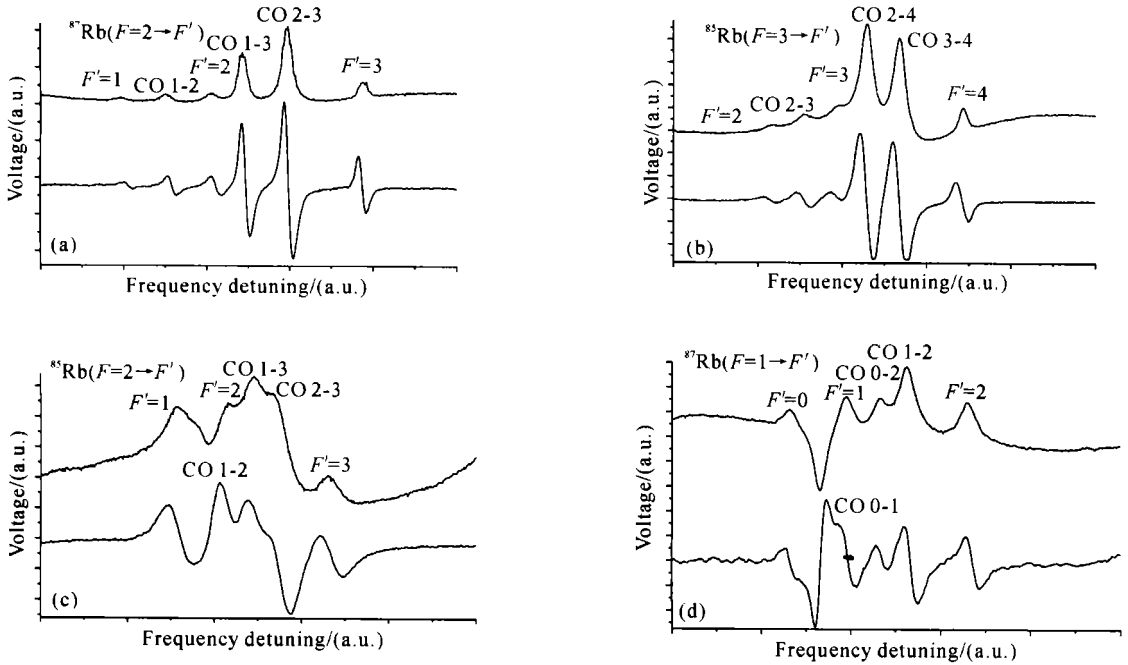


Fig. 9 Saturated absorption spectra for Rb D_2 line hyperfine structure (upper trace) and error signal (lower trace). (a) ^{87}Rb : $5S_{1/2}$, $F=2 \rightarrow 5P_{3/2}$, F' ; (b) ^{85}Rb : $5S_{1/2}$, $F=3 \rightarrow 5P_{3/2}$, F' ; (c) ^{85}Rb : $5S_{1/2}$, $F=2 \rightarrow 5P_{3/2}$, F' ; (d) ^{87}Rb : $5S_{1/2}$, $F=1 \rightarrow 5P_{3/2}$, F'

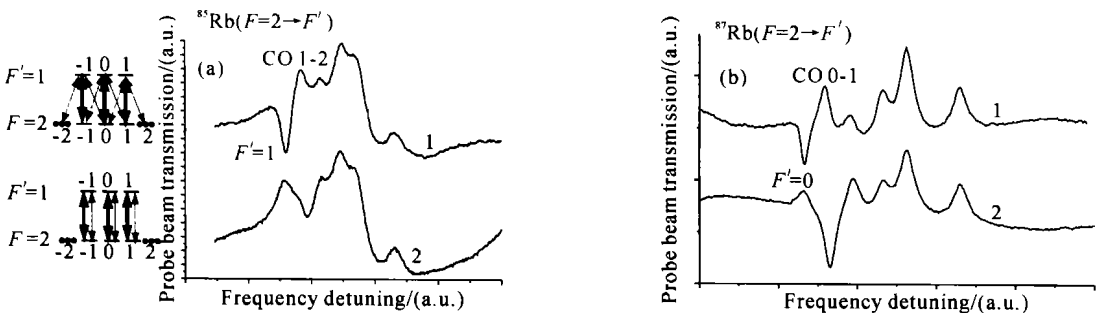


Fig. 10 Saturated absorption spectra for the transition ^{85}Rb ($F=2 \rightarrow F'$) with different polarizations of pump and probe (a) and ^{87}Rb ($F=1 \rightarrow F'$) (b)

^{85}Rb : $F=2 \rightarrow F'=1$ 是一个封闭能级跃迁,上能级 $F'=1$ 的电子通过自发辐射只能返回到基态能级 $F=2$ 上,当抽运光为线偏振光时,电子都布居在基态塞曼子能级 $m=-2$ 和 $m=2$ 上。当检测光与抽运光偏振方向平行时,基态塞曼子能级 $m=-2$ 和 $m=2$ 不参与能级跃迁,因此对检测光吸收减小;当检测光与抽运光偏振方向垂直时,基态塞曼子能级

$m=-2$ 和 $m=2$ 将参与能级跃迁,因此对检测光吸收增强。现在我们将激光频率锁定在 ^{87}Rb : $F=2 \rightarrow F'$ 的交叉峰 CO 2-3 上,从图 11(a) 上交叉峰 CO 2-3 的微分误差信号可看出, A 点到 B 点的频率失谐范围约为 12 MHz,对激光频率的分辨率为 $1.6 \text{ MHz}/\text{V}$ 。首先我们测量激光器自由运转时的频率漂移,将微分误差信号不送入激光控制电路,通过调节直流偏

置电压将激光频率调谐到微分误差信号的中心点, 并且逐渐减少扫描斜波信号的电压到零, 然后微分误差信号送入示波器记录, 从图 11(b) 中可看出, 自由运转的激光器在 10 s 内频率漂移小于 10 MHz, 当把微分误差信号送入激光控制电路, 激光器频率被

锁定在交叉峰 CO 2-3 上, 微分误差信号变为一条直线, 激光器在 10s 内频率漂移小于 1 MHz。该激光器系统可连续运转 3 h 以上而不失锁。如果两台独立稳频的激光器进行拍频可精确给出激光的频率稳定性。

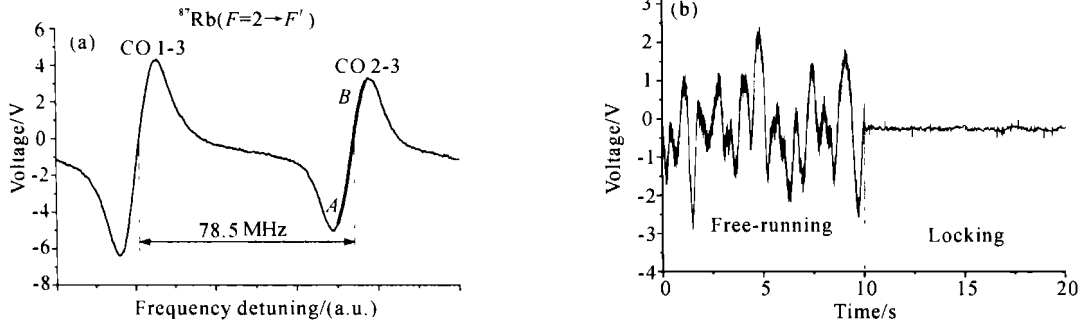


Fig. 11 The error signal (a) and the frequency fluctuations in the case of free-running and locking (b)

结论 用饱和吸收光谱法实现对半导体激光器的稳频, 实验上我们获得具有高信噪比的饱和吸收光谱信号, 大大提高了半导体激光器的频率锁定灵敏度及长期稳定性, 该系统将用于 Rb 原子的激光冷却与囚禁。

参 考 文 献

- 1 Wieman C E, Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(1): 1~20
- 2 MacAdam K B, Steimbach A, Wieman C. A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback and a saturated absorption

spectrometer for Cs and Rb. *Am. J. Phys.*, 1992, **60**(12): 1098~1111

- 3 Zhang Jing, Zhang Tiancai, Dong Ruifang *et al.*. Influence of birefringence induced at low temperature on balanced detection of polarization-dependent photon-number squeezing and its optical compensation. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2001, **18**(7): 1014~1018
- 4 Huntington E H, Lam P K, Ralph T C *et al.*. Noiseless independent signal and power amplification. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 540~542
- 5 Schmidt O, Knaak K M, Wynands R *et al.*. Cesium saturation spectroscopy revisited: How to reverse peaks and observe narrow resonances. *Appl. Phys. (B)*, 1994, **59**(2): 167~178

A Laser Diode System Stabilized on the Saturated Absorption Lines of Rubidium Atoms

Zhang Jing Tao Hua Wei Dong Dong Yabin Geng Tao Wang Junmin Peng Kunchi
(Institute of Opto-Electronics, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
Shanxi University, Taiyuan 030006)

(Received 27 December 2001; revised 26 March 2002)

Abstract: Frequency of diode laser is stabilized by using saturated absorption spectroscopy. High signal-to-noise ratio of differential error signal of saturated absorption spectroscopy is achieved by designing and optimizing the servo loop, thus the sensitivity of frequency locking and long-term frequency stability are improved. This system may be used to the realization of laser cooling and trapping of rubidium atoms.

Key words: diode laser; saturated absorption spectroscopy; frequency stabilization; signal-to-noise ratio