

文章编号: 0253-2239(2004)12-1649-4

原子饱和吸收谱谐波稳频短期稳定度研究*

陈 超 张 剑 刘新元 汪 中 陈徐宗

(北京大学电子学系, 北京 100871)

摘要: 介绍了利用腔外饱和吸收谱的三次谐波和五次谐波稳频方法对半导体激光器进行稳频的原理, 分析了使用这两种稳频方法对半导体激光器进行稳频时所得到的激光频率短期稳定度的理论估算方法, 提出了通过选取最佳调制深度来优化短期稳定度的方法和原理, 并在理论上比较了两种稳频方法得到的短期稳定度的差异。然后讨论了半导体激光稳频电路系统的设计, 并利用该电路系统, 分别用三次谐波和五次谐波稳频的方法将半导体激光器的频率锁定在的⁸⁷Rb 饱和吸收的 $F=2 \rightarrow F'=3, 1$ 线上, 并使用我们提出的短期稳定度优化方案进行稳定度优化, 通过对误差信号的分析, 估算出的频率稳定度达到 10^{-12} 的量级, 使用采集到的误差信号在实验上比较了两种稳频方法所得的稳定度的, 其结果和理论基本吻合。

关键词: 激光技术; 光频标; 饱和吸收谱线; 三次谐波和五次谐波; 稳频电路系统

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Study on Laser Frequency Short-Term Stability

Chen Chao Zhang Jian Liu Xinyuan Wang Zhong Chen Xuzong

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 29 April 2003; revised 26 May 2004)

Abstract: Firstly, the short-term stability of the laser's frequency stabilized is theoretically studied by methods of third and fifth harmonic, and the experiment of increasing the frequency short-term stability is performed. Secondly, the semiconductor laser's frequency stabilized circuit system is discussed, and by using this system to take the rubidium 87's hyperfine spectra $F=2$, $F'=3, 1$ as reference frequency, that laser's frequency is stabilized by the third harmonic sign and fifth harmonic sign of saturated absorption spectra of ⁸⁷Rb. The laser used is DL100 of TuiOptics, center wavelength is 780 nm, linewidth is 1 MHz, and finally a frequency stabilization got is 10^{-12} . We computed the short-term stability generated by these two stabilization technology theoretically is computed, and the calculated result with the experimental result is compared, and they were similar to each other.

Key words: laser technique; optical frequency standard; saturated absorption spectra; third and fifth harmonic; frequency stabilized circuit system

1 引 言

稳频半导体激光器作为新一代的稳频光源在精密测量、光通讯和光频标等领域有着广泛的应用。激光稳频的方法很多, 如调制转移光谱稳频^[1], 饱和吸收光谱谐波稳频等。激光饱和吸收谱谐波稳频是传统的高精度稳频方法^[2~5], 系统搭建较调制转移

光谱稳频简单。原理是用一些分子或原子的高稳定的跃迁谱线作为参考频率标准^[6], 利用它的饱和吸收光谱信号中的三次或五次谐波信号将激光频率锁定在分子或原子的跃迁中心频率上。用三次和五次谐波稳频这两种方法各有优点, 用于稳频的三次谐波信号的信噪比要比五次谐波信号的信噪比高, 而五次谐波信号对于消除不规则多普勒本底的效果要优于三次谐波信号^[7]。本文首先讨论了两种稳频方法所得到的激光频率短期稳定度的理论估算方法, 对两种方法进行了比较, 并提出了优化短期稳定度的方法。然后设计了半导体激光稳频电路系统, 利

* 国家自然科学基金(10074003)、国家 973 计划(2001CB309308)、教育部重大课题(00-90)资助课题。

E-mail: chaochen@263.net

收稿日期: 2003-04-29; 收到修改稿日期: 2004-05-26

用该系统对半导体激光器进行三次谐波和五次谐波稳频,实验中用 ^{87}Rb 的 $5P_{3/2}$ 到 $5S_{1/2}$ 的超精细能级跃迁频率作为参考频率标准^[8],激光器为 TuiOptics 公司 DL100 型半导体激光器,中心波长 780 nm,线宽 1 MHz,该激光器为外腔反馈式半导体激光器^[9]。

2 频率短期稳定度的计算及优化方法

根据频率稳定度的估算公式,该公式主要是考虑由噪声引起的激光频率变化的不确定度

$$\delta(\tau) = \left(\frac{\nu}{\Delta\nu} \frac{S}{N} \right)^{-1} \left(\frac{W}{\tau} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

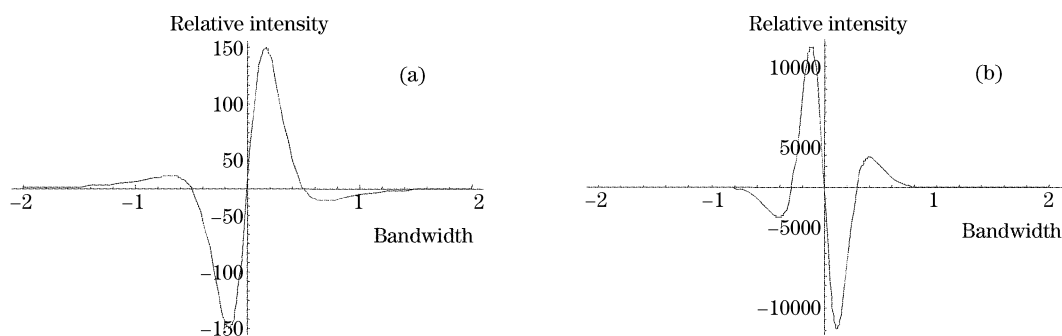


Fig. 1 (a) Third harmonic signal, (b) fifth harmonic signal

下面是关于调制深度 A 和 $S/\Delta\nu$ 关系的计算结果(由于实验中采用的是铷原子 ^{87}Rb ,所以计算中设定的饱和吸收谱线线宽 $\gamma=10$ MHz)。

由图 2 显示的结果可知欲采用三次谐波和五次谐波稳频得到最佳激光频率短期稳定度,这两种方

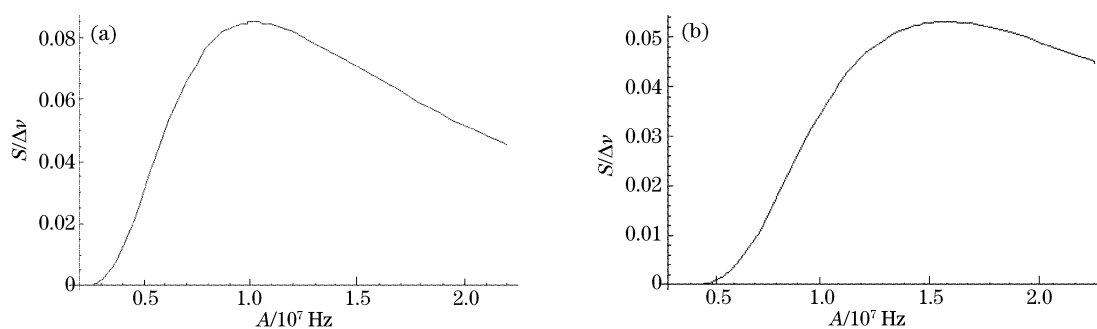


Fig. 2 (a) Third harmonic signal's vs modulation depth, (b) fifth harmonic signal's vs modulation depth

将上面的计算结果代入(1)式可得到两种稳频方法短期稳定度的相对关系

$$\frac{\delta^{(3)}(t)}{\delta^{(5)}(t)} = \frac{(S/\Delta\nu)^{(5)}}{(S/\Delta\nu)^{(3)}} \approx \frac{0.053}{0.085} \approx 0.62, \quad (2)$$

由(2)式可知三次谐波稳频得到的频率短期稳定度略高于五次谐波稳频得到的频率短期稳定度。但是在饱和吸收谱线中多普勒本底的轮廓是近似的二次曲线,五次谐波信号可以使本底消除的更彻底,因此

式中 ν 是激光频率, $\Delta\nu$ 是鉴频范围, S/N 是微分信号的信噪比, t 是稳定度测量时间间隔, W 是稳频电路系统低通滤波的时间常数,一般情况下, $W/\tau \approx 1$ 。

在(1)式中, ν 是固定值, N 是噪声强度,一般是整个稳频系统各部分的噪声叠加,无法通过简单方法降低或消除,而鉴频范围 $\Delta\nu$ 和信号强度 S 则由激光频率的调制深度 A 决定,适当的选择 A 可以得到较高的短期稳定度 $\delta(\tau)$ 。我们只关心(1)式中的 $S/\Delta\nu$ 项,如何得到它的最大值,它所对应的就是的最小值。由图 1 饱和吸收光谱的三次和五次谐波信号的图样可知, $S/\Delta\nu$ 就是谐波曲线在谱线中心处的斜率。

法分别对应一个最佳调制宽度 A ,当饱和吸收谱线宽为 10 MHz 时,三次谐波稳频的激光频率最佳调制宽度约为 8 MHz,五次谐波稳频的激光频率最佳调制宽度约为 13 MHz。

五次谐波稳频方法可以得到更高的复现性。

3 半导体激光稳频电路系统原理及具体实现

图 3 是半导体激光器的稳频系统,它由五大模块组成:可调谐半导体激光器、精密电流控制、精密温度控制、压电陶瓷(PZT)外腔驱动器和稳频电路

系统(伺服环路)。

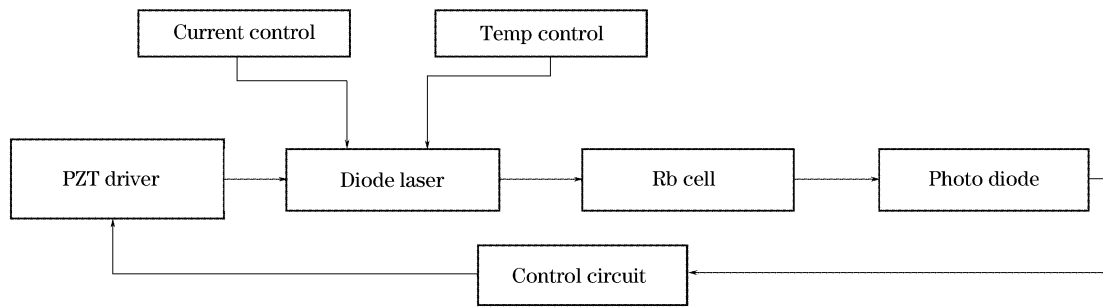


Fig. 3 Frequency stabilization system

稳频电路系统如图 4 所示,由几个部分组成:信号发生器(Crystal),带通滤波整形(BPF),信号移相(Phase shift),带通滤波放大(BPF),鉴相器(PSD),低通滤波放大(LPF & AMP)。信号发生器提供稳频所需要的调制信号,三种稳频的鉴频参考信号(基频 f ,三次谐波 $3f$,五次谐波 $5f$)。带通滤波整形是把信号发生器输出的方波信号整形为谐波抑制比很高的正弦信号,调制信号的谐波抑制比应该在 $70\sim 80$ dB 以上,鉴频参考信号的谐波抑制比应该在 $50\sim 60$ dB 以上。信号移相是对信号的相位进行移动,同时不能改变信号的幅度大小,由于半导体激光器稳频环路(特别是光电信号的转换以及激光器本身的工作状态)对信号相位产生不应有的移动,这将对鉴频有明显的影响,会降低伺服环路的控制性能,所以设计出这一部分的电路是必需的。带通滤波放大是对得到的光电信号进行选频放大,滤掉其余的频率成分,对于三类稳频方法,带通滤波放大选出相应的鉴频信号:基频,三次谐波,五次谐波成分。鉴频部分实际上是一个乘法器,它实现了参考信号和相应的鉴频信号的相乘运算。低通滤波放大实际上是一个积分放大器,它对输入的信号在基频信号的周期上进行积分运算,最后得到输入信号的直流成分,对此直流成分进行一定的放大,然后输出到压电陶瓷驱动器进行激光频率的控制和纠正。

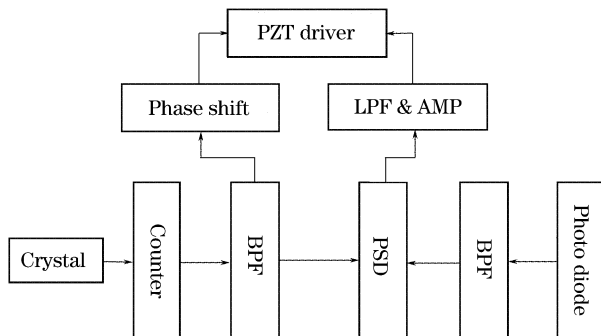


Fig. 4 Circuit diagram in the frequency stabilization system

4 利用 ^{87}Rb 饱和吸收光谱中的谐波信号稳频

图 5 给出了铷原子 ^{87}Rb 的超精细能级^[8],实验中采用 ^{87}Rb 的饱和吸收谱线作为稳频参考谱线。利用稳频电路可以得到六条饱和吸收谱线的三次谐波和五次谐波信号(如图 6 所示)。

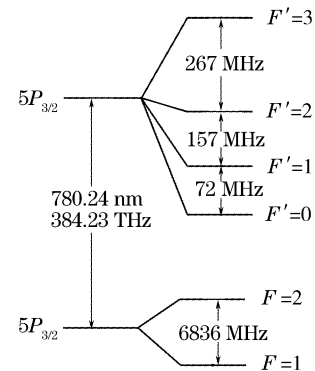


Fig. 5 Hyperfine structure of ^{87}Rb

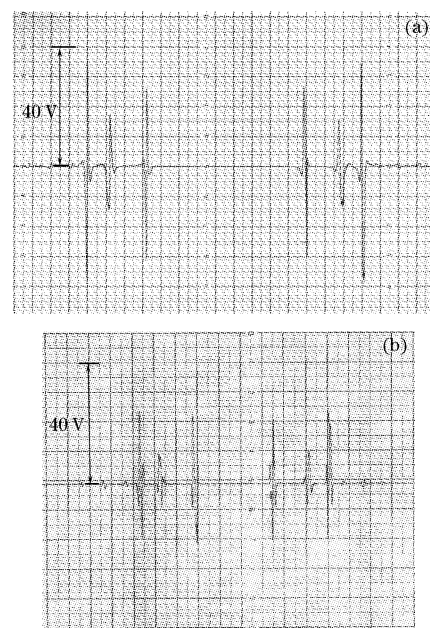


Fig. 6 (a) Third harmonic signal, (b) fifth harmonic signal

稳频实验中以 $F = 2 \rightarrow F' = 3, 1$ 跃迁的交叉共振线做为稳频参考谱线。图 7 是双笔记录仪记录的激光自由运转以及用三次谐波和五次谐波两种方法稳频后的频率误差输出信号曲线。实验中三次谐波稳频调制宽度 A 约为 8 MHz, 五次谐波稳频调制宽度 A 约为 13 MHz。

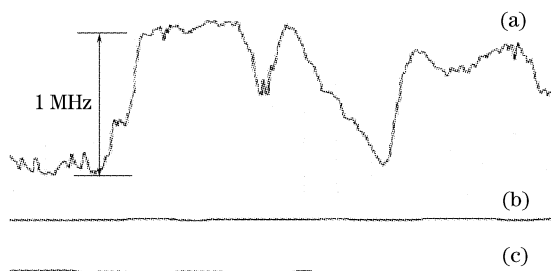


Fig. 7 (a) Error signal of free running, (b) error signal of third harmonic stabilizing, (c) error signal of fifth harmonic stabilizing

提高双笔记录仪的灵敏度观察稳频后激光频率的误差输出信号, 如图 8 所示。

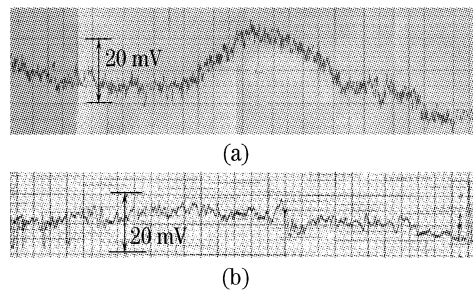


Fig. 8 (a) Error signal of third harmonic stabilizing, (b) error signal of fifth harmonic stabilizing

由图 8 估算短期噪声强度, 图 8(a) 中, 短期噪声强度约为 8 mV, 图 8(b) 中, 短期噪声强度约为 5 mV, 图 6(a) 中信号强度约为 35 V, 图 6(b) 中信号强度约为 21.5 V。三次谐波信号稳频中, 当调制宽度 A 为 8 MHz 时, 对应的鉴频范围 $\Delta\nu$ 约为 7 MHz, 五次谐波信号稳频中, 当调制宽度 A 为 13 MHz 时, 对应的鉴频范围 $\Delta\nu$ 约为 8 MHz, 由以上这些结果即可对两种稳频方法得到的激光频率短期稳定度进行估算。稳定度估算中的时间间隔为秒量级:

$$\delta^{(3)}(t) = \left[\frac{u^{(3)}}{\Delta\nu^{(3)}} \frac{S^{(3)}}{N^{(3)}} \right]^{-1} \left(\frac{\tau}{W} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{3.8 \times 10^{14}}{7 \times 10^6} \frac{35}{8 \times 10^{-3}} \right)^{-1} \approx 4.2 \times 10^{-12}, \quad (3)$$

$$\delta^{(5)}(t) = \left[\frac{u^{(5)}}{\Delta\nu^{(5)}} \frac{S^{(5)}}{N^{(5)}} \right]^{-1} \left(\frac{\tau}{W} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{3.8 \times 10^{14}}{8 \times 10^6} \frac{21.5}{5 \times 10^{-3}} \right)^{-1} \approx 4.9 \times 10^{-12}. \quad (4)$$

结论 本文首先讨论了利用铷原子超精细跃迁饱和谱线的三次谐波信号稳频和五次谐波信号稳频两种激光稳频方法所得到的激光频率短期稳定度的理论估算方法, 对两种方法进行了比较, 并提出了优化短期稳定度的方法。然后讨论了半导体激光稳频电路的设计和具体实现, 并利用该电路系统对半导体激光器进行稳频, 比较了两种激光稳频方法得到的实验结果。实验结果与理论计算结果基本吻合。目前, 我们已将该稳频系统用于铷原子的玻色-爱因斯坦凝聚实验, 并获得了稳定的铷原子磁光阱。

参 考 文 献

- Zheng Wenqiang, Bi Zhiyi, Luo Ming *et al.*. Application of $^{127}\text{I}_2$ Doppler broadened FM spectroscopy to frequency stabilization of mini Nd:YVO₄ laser. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(2): 161~163 (in Chinese)
- Edwards C S, Rowley W R C. A 633 nm iodine-stabilized diode-laser frequency standard. *Metrologia*, 1999, **36**: 51~45
- Simonsen H R, Zarka A. Iodine-stabilized extended-cavity diode laser at 633 nm: result of international comparison. *Metrologia*, 1998, **35**: 197~202
- Eickhoff M L, Hall J L. Optical frequency standard at 532 nm. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, **44**(2): 155~158
- Edwards C S, Rowley W R C. Absolute frequency stabilization of a 637 nm laser diode using Doppler-free I₂ spectra. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 796~797
- Wallard A J. Frequency stabilization of the helium-neon laser by saturated absorption in iodine vapour. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1972, **5**(9): 926~930
- Lassila A, Chartier J M. International comparison of He-Ne laser stabilized with at 633 nm (Comparison of the fifth-and-third-harmonic locking techniques). *Metrologia*, 2000, **37**: 701~707
- Steck D A. Rubidium 87 D Line Data. <http://steck.us/alkalidata>, 2001, 1~29
- Zhang Jian, Chen Xuzong, Wang Yiqiu. Analysis on continuous tuning range of tunable diode lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(10): 1120~1124 (in Chinese)