

文章编号: 0258-7025(2007)07-0895-06

# 外腔半导体激光器设计与高次谐波稳频

陈文兰, 袁 杰, 齐向晖, 伊 林, 汪 中, 刘新元, 陈徐宗

(北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

**摘要** 研究了利特罗(Littrow)结构外腔半导体激光器的结构参量对激光连续可调范围的影响。给出了反射镜转轴等处的机械加工误差对激光波长连续可调范围所造成的影响的数值计算结果。介绍了半导体激光器外腔结构设计的具体细节要点。利用该设计制作的外腔只需要配合商用半导体激光管便可以得到优质的780 nm激光输出, 经测量其线宽小于1 MHz, 连续可调谐范围大于3 GHz。利用腔外 Rb 饱和吸收谱的三、五次谐波稳频方法对半导体激光器进行了稳频。其中提出了优化激光频率短期稳定度的方法, 并对调制深度的选择给出了详细的理论解释。根据该优化方法设计出稳频系统对半导体激光器进行稳频, 得到了稳定度达到  $10^{-12}$  量级的半导体激光输出。

**关键词** 激光技术; 光栅外腔半导体激光器; 高次谐波稳频

**中图分类号** TN 242 **文献标识码** A

## Design of 780 nm External Cavity Semiconductor Laser and Higher Harmonic Frequency Stabilization

CHEN Wen-lan, YUAN Jie, QI Xiang-hui, XI Lin,

WANG Zhong, LIU Xin-yuan, CHEN Xu-zong

(School of Electronics Engineering & Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The influence of structural parameters on laser wavelength continuous tuning range in external cavity semiconductor laser with Littrow configuration is studied. The influence of allowed machining errors at the key points such as the mirror rotation axis on laser wavelength continuous tuning range is calculated. The details of designing external cavity semiconductor laser are presented. An external cavity semiconductor laser is designed, and with a commercial semiconductor laser tube it can produce qualified 780 nm laser, with line width less than 1 MHz and wavelength continuous tuning range of 3 GHz. The semiconductor laser is frequency stabilized by use of the third and fifth harmonics of Rb saturated absorption spectra. The method for optimizing the laser frequency short-term stability is proposed, and the choice of modulating depth is explained theoretically in detail. With the proposed frequency stabilizing method, the stability of laser reaches  $10^{-12}$  at 780 nm wavelength.

**Key words** laser technique; grating external cavity semiconductor laser; higher harmonic frequency stabilization

## 1 引 言

由于半导体激光器相对于传统激光器具有体积小、功率大、效率高、结构简单、价格便宜、便于调谐等优点, 目前除被广泛应用于光通信、光测距、光存储等领域外, 还在原子分子精密光谱、量子频标、激

光冷却、玻色-爱因斯坦凝聚等前沿基础研究中发挥日益重要的作用。这些研究要求激光具有很宽的可连续可调谐范围、较窄的线宽和很高的频率稳定性。

一方面, 外腔半导体激光器为实现窄线宽、大连续调谐范围的激光输出提供了一种可能的途径。它利用外腔延伸腔长来压窄激光线宽, 同时连续改变

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-03-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60490280), 国家重点基础研究课题(2001CB309308, 2005CB3724500)和国家自然科学基金(60271003)资助课题。

作者简介: 陈文兰(1983—), 女, 重庆人, 博士研究生, 主要研究方向为激光物理与技术。E-mail: cwl@pku.edu.cn

导师简介: 陈徐宗(1958—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为激光物理与技术。

E-mail: xuzongchen@pku.edu.cn

激光器外延腔的腔长来实现出射激光波长或频率的连续改变。但是在一般情况下,大范围连续调谐外腔腔长的过程中会出现跳模现象,限制了激光频率的连续可调谐范围。因此,如何抑制这种跳模现象,在机械加工精密程度有限的情况下尽量增大激光频率的连续可调谐范围便成为问题的关键<sup>[1]</sup>。

另一方面,利用饱和吸收谱谐波稳频技术<sup>[1~4]</sup>,可以有效提高半导体激光的频率稳定度。其基本原理是用一些分子或原子(例如碘分子、铷原子、铯原子等)的高稳定跃迁谱线作为参考频率标准,利用它的饱和吸收光谱信号中的奇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。

本文对抑制连续改变激光器外腔腔长,增大激光频率的连续可调谐范围进行了理论分析并在实验中进行了运用<sup>[5]</sup>。另外,利用一次、三次、五次谐波三种稳频方法得到了激光频率短期稳定度的理论估算方法,对这三种稳频方法进行了比较,提出了优化短期稳定度的方案,并且据此设计了半导体激光稳频系统,得到了频率稳定度高达  $10^{-12}$  的半导体激光。

## 2 外腔半导体激光器的设计和连续可调谐范围

### 2.1 理想利特罗结构激光器的基本原理

图 1 为利特罗(Littrow)结构激光器基本原理图。图中 R 为闪耀光栅转动轴,闪耀光栅与半导体激光管构成激光器的外腔,闪耀光栅的 1 级衍射光被闪耀光栅沿激光头出射激光反方向反射回来,设闪耀光栅的 1 级衍射波长为  $\lambda_r$ ,则有

$$\lambda_r = 2d\sin\theta, \quad (1)$$

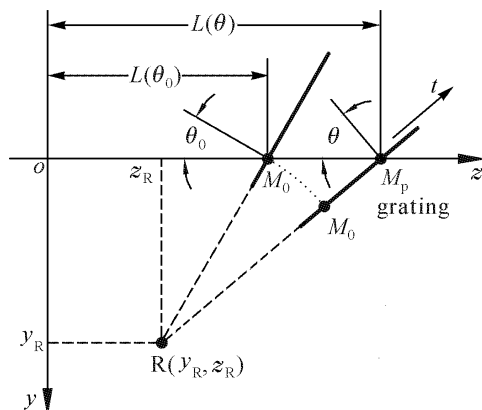


图 1 利特罗结构激光器

Fig. 1 External cavity semiconductor laser with Littrow configuration

腔内纵模模数为  $q$  的激光波长

$$\lambda_q = 2L(\theta)/q, \quad (2)$$

考虑到闪耀光栅转动时,反射平面与入射光的相对位移对腔内激光相位的影响,式(2)需要修正为<sup>[6,7]</sup>

$$\lambda_q = 2L(\theta)/[q - t(\theta)/d], \quad (3)$$

式中  $L(\theta)$  为激光器腔长,  $t(\theta)$  为激光管出光点对光栅的相对位移,即图 1 中  $M_0$  与  $M_p$  之间的距离。

构造函数  $F(\theta)$  来考虑  $\lambda_q$  和  $\lambda_r$  的差

$$F(\theta) = \lambda_q(\theta) - \lambda_r(\theta), \quad (4)$$

初始时刻有  $F(\theta_0) = 0$ , 当光栅绕转动轴 R 转动时,改变腔长  $L$ , 则  $\lambda_q$  和  $\lambda_r$  随之变化, 当  $F(\theta)$  小于激光腔的纵模间距的半值时, 激光腔内谐振激光的模数一直为  $q$ , 并且  $\lambda_q$  随光栅的转动而连续变化; 当  $F(\theta)$  大于激光腔的纵模间距的半值时, 将会出现跳模现象, 出射光波长会跳到  $\lambda_{q\pm 1}$  而不再连续变化。所以抑制跳模的条件为

$$|F(\theta)| < (\Delta\lambda/2), \quad (5)$$

其中  $\Delta\lambda$  为纵模间隔。由几何关系可推出

$$F(\theta) = 2d[L(\theta_0) + t_0(\theta)\sin\theta_0] \times \{\cos\theta_0\sin(\theta - \theta_0)[y_R\tan\theta_0 - L(\theta_0)] + z_R\sin\theta_0[1 - \cos(\theta - \theta_0)]\}, \quad (6)$$

由(6)式可以看出, 闪耀光栅转动时, 为了能起到抑制跳模作用, 需使  $F(\theta)$  随  $\theta - \theta_0$  的一级小量的变化保持为零, 即要求转动轴坐标  $(y_R, z_R)$  满足条件

$$z_R = 0, \quad (7)$$

$$y_R\tan\theta_0 - L_0 = 0. \quad (8)$$

### 2.2 误差对激光连续可调谐范围的影响

实际加工中各个零件的相对位置总会存在几何误差, 为此分析总结了可能存在的误差对激光连续可调谐范围的影响<sup>[8]</sup>。

以激光器及其出射光来确定坐标系, 假设闪耀光栅在转动时只有一个转动轴, 并且该轴在转动时不会移动。那么, 引起误差的因素在于闪耀光栅的位置和闪耀光栅转动轴的位置。因为闪耀光栅是可旋转的, 闪耀光栅的位置误差可以归到闪耀光栅转动轴的误差上处理。这样只需要计算出闪耀光栅的转动轴在  $y$  轴和  $z$  轴方向的误差对激光波长连续可调谐范围的影响。

闪耀光栅转动轴存在误差时, 随着闪耀光栅的转动, 函数  $F(\theta)$  的一级小量将不再一直保持为零。当  $F(\theta)$  的绝对值大于激光腔纵模间隔的半值时就会产生跳模现象。由(5)和(6)式可得到闪耀光栅转动轴存在误差情况下激光器的连续可调谐范围。图 2 给出了两种典型误差情况下连续可调谐范围的计算结

果,图 2(a)是闪耀光栅转动轴的  $y$  轴方向误差为零 ( $\Delta y_R = 0$ ) 时,  $z$  轴方向误差在  $\pm 1$  cm 内变化对激光器连续可调范围的影响。图 2(b)是闪耀光栅转动轴的  $z$  轴方向误差为零 ( $\Delta z_R = 0$ ) 时,  $y$  轴方向误差在  $\pm 100 \mu\text{m}$  内变化对激光器连续可调范围的影响。图中上下两条曲线分别为连续可调范围的上限和下限。比较两图可知在  $y$  方向的误差  $\Delta y$  对连续可调范围的影响比在  $z$  方向的误差  $\Delta z$  的影响要大得多。 $y$  轴方向  $0.1$  mm 的误差会使激光器的连续可调范围降到  $2$  nm; 而  $z$  轴方向  $1$  mm 的误差只会使激光器的连续可调范围降到  $20$  nm。

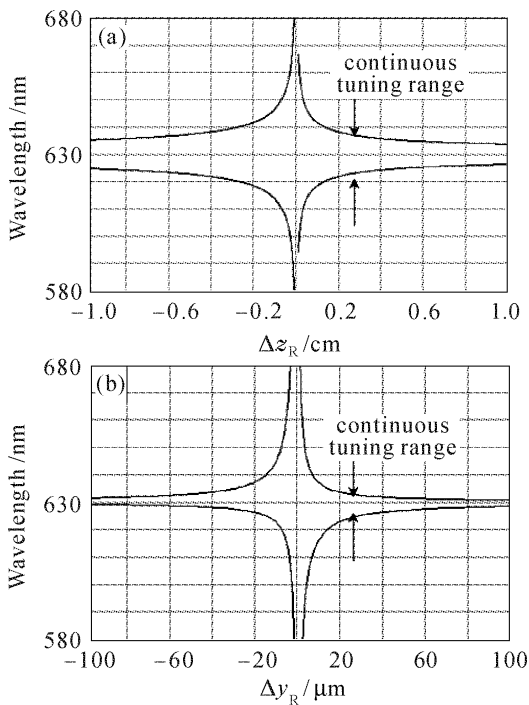


图 2 闪耀光栅转动轴分别在  $z$  轴的误差在  $\pm 1$  cm 内(a)和  $y$  轴的误差在  $\pm 100 \mu\text{m}$  内(b)变化时,对激光波长连续可调范围的影响

Fig. 2 Influence of blazing grating rotation axis error on the continuous tuning range of wavelength when  $\Delta y = 0$ ,  $\Delta z \leq 1$  cm (a) and  $\Delta z = 0$ ,  $\Delta y \leq 100 \mu\text{m}$  (b)

### 2.3 外腔半导体激光器研制及性能测试

选定光栅转动轴与半导体激光管的相对位置,以增大连续可调谐范围。在设计外腔半导体激光器时,还需要考虑外腔腔长的选定。由于外腔半导体激光的输出线宽与外腔腔长的平方成反比,从压窄线宽的角度看,外腔腔长越长越好(即光栅离激光出射面越远越好)。但是当外腔的纵模间隔小于弛豫振荡特征频率时(一般为几个吉赫兹),输出激光会出现多模、功率急剧变化等严重的不稳定现象<sup>[9]</sup>。

这时只能采用在激光管出光表面镀膜的方法得到单模稳定光。但镀膜工序繁杂,费用很高,因此选用了  $15$  mm 长的短外腔。这样,只需配合商用半导体激光管,就能得到很好的模式和稳定度。同时,整个腔的设计采用铍铜为材料,利用材料弹性进行外腔长度和衍射光栅角度的微调,使得激光器具有很高的稳定性,对外界震动不敏感。另外考虑了光束输出方向保持不变等情况<sup>[10,11]</sup>,设计如图 3 所示。

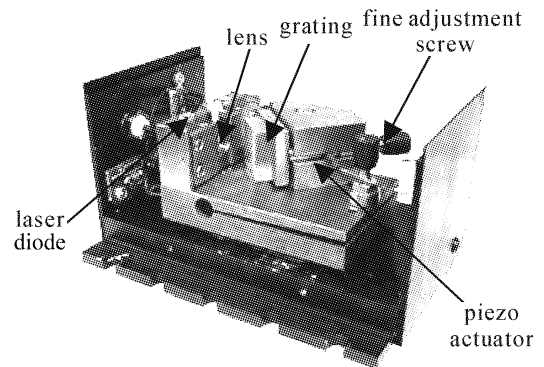


图 3 设计装配的利特罗结构外腔半导体激光器  
Fig. 3 Home-made external cavity semiconductor laser with Littrow configuration

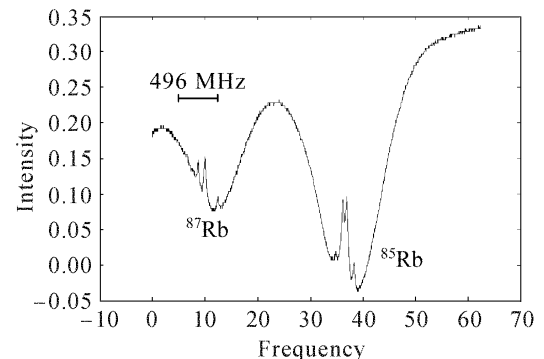


图 4 用自制激光器扫描获得的 Rb 原子的饱和吸收谱线,扫描范围达到  $3$  GHz

Fig. 4 Rb saturated absorption spectrum gained with home-made external cavity semiconductor laser with continuous tuning range of  $3$  GHz

用扫描激光频率探测 Rb 原子谱线的方法测量激光连续可调范围。在图 4 中,压电陶瓷(PZT)驱动连续可调范围达到了  $3$  GHz,可见激光器的连续可调范围达  $3$  GHz 以上。

通过两台自行设计的激光器相互拍频的办法,用频谱分析仪分析拍频信号,测得两台激光器的线宽均优于  $500$  kHz(拍频信号线宽小于  $500$  kHz),指标达到了国际先进水平<sup>[12~15]</sup>。

### 3 原子饱和吸收谱谐波稳频的短期稳定度

#### 3.1 频率短期稳定度的计算及优化方法

考虑由噪声引起的激光频率变化的不确定度, 有如下形式

$$\sigma(\tau) = \left(\frac{\nu}{\Delta\nu} \times \frac{S}{N}\right)^{-1} \times \left(\frac{\tau}{W}\right)^{1/2}, \quad (9)$$

式中  $\nu$  为激光频率,  $\Delta\nu$  为鉴频范围,  $S/N$  为微分信号的信噪比,  $N$  为噪声强度,  $S$  为信号强度,  $\tau$  为稳定度测量时间间隔,  $W$  为稳频电路系统低通滤波的时间常数。

一般情况下, 取  $\tau/W \approx 1$ ,  $\nu$  是固定值,  $N$  是整个稳频系统各部分的噪声叠加, 受调制深度  $A$  影响很小, 而鉴频范围  $\Delta\nu$  和信号强度  $S$  极大地依赖于激光的调制深度  $A$ 。由(9)式知, 适当地选择  $A$  使  $S/\Delta\nu$  取最大值时,  $\sigma(\tau)$  得到最小值, 对应较高的短期稳定度。

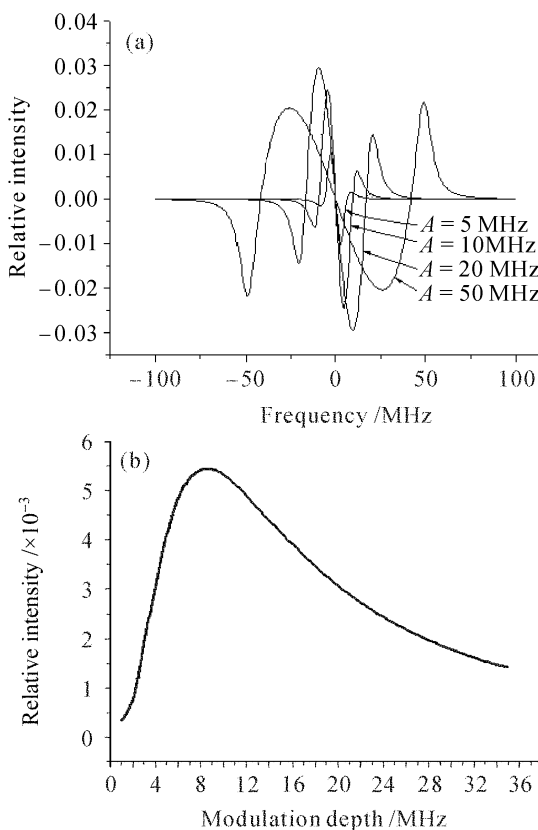


图 5

(a) 对半导体激光器激光频率加入不同的调制深度  $A$  时, 对应的饱和吸收谱的三次谐波信号的理论计算线形; (b) 不同的调制深度  $A$  对应的饱和吸收谱三次谐波信号的  $S/\Delta\nu$

Fig. 5

(a) calculated saturated absorption third-harmonic spectrum of Rb with different modulation depth; (b) calculated  $S/\Delta\nu$  ratio of saturated absorption third-harmonic spectrum for different modulation depth

计算结果图 5(a) 和图 6(a) 显示了调制深度  $A$  对鉴频范围  $\Delta\nu$  和信号强度  $S$  的影响。在计算中, 为了避免误差, 对饱和吸收线型  $G(\omega)$  没有采用泰勒展开的近似处理。由于实验中采用的是  $^{87}\text{Rb}$  原子<sup>[16]</sup>, 计算中设定的饱和吸收谱线线宽  $\gamma = 10$  MHz。可以看到, 激光调制深度  $A$  越大, 鉴频范围  $\Delta\nu$  就越大, 而信号强度  $S$  则在调制深度  $A$  超过某一值后变小。而且比较不同调制深度  $A$  的信号形状可知, 随着调制深度  $A$  的增大, 信号会出现“失真”现象, 变得难以分辨, 特别是当实验原子的谱线较密时, 每一条谱线的谐波信号更加难以分辨。

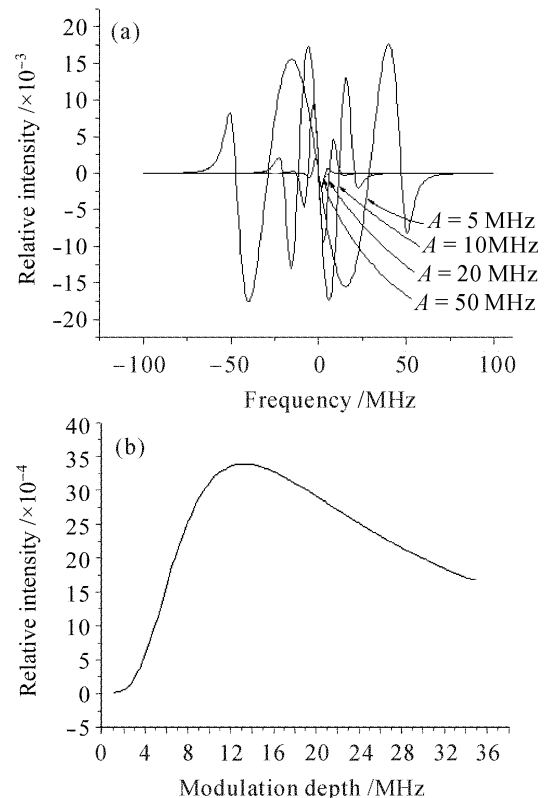


图 6

(a) 对半导体激光器激光频率加入不同的调制深度  $A$  时, 对应的饱和吸收谱的五次谐波信号的理论计算线形; (b) 不同的调制深度  $A$  对应的饱和吸收谱五次谐波信号的  $S/\Delta\nu$

Fig. 6

(a) calculated saturated absorption fifth-harmonic spectrum of Rb with different modulation depth; (b) calculated  $S/\Delta\nu$  ratio of saturated absorption fifth-harmonic spectrum for different modulation depth

由图 5(b) 和图 6(b) 可以看出调制深度  $A$  对  $S/\Delta\nu$  的影响。为采用三次、五次谐波稳频获得最佳激光频率短期稳定度, 这两种方法分别对应一个最佳调制深度  $A$ 。当饱和吸收谱线线宽为 10 MHz 时, 三次谐波稳频的激光频率最佳调制深度约为 8 MHz, 五次谐波稳频的激光频率最佳调制深度约

为 13 MHz。将计算结果代入(9)式可得到两种稳频方法得到的短期稳定度的相对关系

$$\frac{\sigma^{(3)}(\tau)}{\sigma^{(5)}(\tau)} = \frac{(S/\Delta\nu)^{(5)}}{(S/\Delta\nu)^{(3)}} \approx \frac{0.0034}{0.0054} = 0.63, \quad (10)$$

由(10)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,其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地消除得更彻底,因此五次谐波稳频方法可以得到更高的复现性。

### 3.2 $^{87}\text{Rb}$ 饱和吸收光谱中的高次谐波信号稳频

由于交叉共振的原因, $^{87}\text{Rb}$  原子从  $^5P_{3/2}$  的  $F' = 3, 2, 1$  到  $^5S_{1/2}$  的  $F = 2$  跃迁共有 6 条跃迁线。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 7 所示。

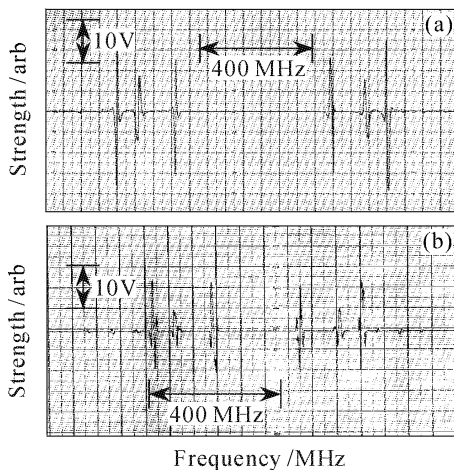


图 7 铷原子超精细跃迁饱和吸收谱线的三次(a)和五次(b)谐波信号

Fig. 7 Saturated absorption third- (a) and fifth- (b) harmonic spectrum based on  $^{87}\text{Rb}$  fine transition

稳频实验中以  $F = 2 \rightarrow F' = 3, 1$  跃迁的交叉共振线作为稳频参考谱线。图 8 是双笔记录仪记录的激光自由运转以及用三次、五次谐波两种方法稳频后的频率误差输出信号曲线。由频率锁定之后的误差输出信号可估算短期噪声强度,利用三次谐波信号锁定后激光短期噪声强度约为 8 mV,利用五次谐波信号锁定后激光短期噪声强度约为 5 mV,图 7(a)中信号强度约为 35 V,图 7(b)中信号强度约为 21.5 V。三次谐波信号稳频中,当调制深度为 8 MHz 时,对应的鉴频范围约为 7 MHz,五次谐波信号稳频中,当调制深度为 13 MHz 时,对应的鉴频范围约为 8 MHz。时间间隔取秒量级,因此对两种稳频方法得到的激光频率短期稳定度的估算结果分别为:  $\sigma_3(\tau) \approx 4.2 \times 10^{-12}$ ,  $\sigma_5(\tau) \approx 4.9 \times 10^{-12}$ 。

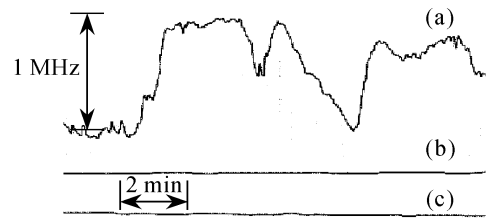


图 8

(a) 半导体激光自由运转直流误差输出;利用三次(b)和五次(c)谐波信号稳频后半导体激光频率的误差信号输出

Fig. 8

(a) DC error signal of free-running external cavity semiconductor laser; error signal of third- (b) and fifth- (c) harmonic frequency stabilized external cavity semiconductor laser

## 4 结 论

比较全面地讨论了获得宽的连续可调谐范围、较窄线宽和高频率稳定性半导体激光的实现方法。对利特罗结构外腔半导体激光器的连续可调范围和它的结构参量进行了较为详细的理论分析,设计并实现了线宽小于 1 MHz,连续可调谐范围可达 3 GHz 的利特罗结构外腔半导体激光器。利用激光频率短期稳定度的理论估算方法,对饱和吸收光谱一次、三次、五次谐波稳频方法进行了比较,并提出了优化短期稳定度的方法。根据该方法利用稳频系统,以  $^{87}\text{Rb}$  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,对半导体激光器三次谐波和五次谐波进行稳频,得到了短期(秒)频率稳定度达  $10^{-12}$  量级的激光输出。

## 参 考 文 献

- Dai Wutao, Guo Shuguang, Fan Yaxian *et al.*. External cavity semiconductor laser with grating feedback for real-time Raman spectrum analyzer [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12** (11):1112~1115  
戴武涛,郭曙光,樊亚仙等. 适用于现场喇曼谱仪的光栅外腔半导体激光器[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(11):1112~1115
- C. S. Edwards, G. P. Barwood, P. Gill *et al.*. A 633 nm iodine-stabilized diode-laser frequency standard [J]. *Metrologia*, 1999, **36**(1):45~51
- H. R. Simonsen, A. Zarka. Iodine-stabilized extended-cavity diode laser at  $\lambda = 633$  nm; result of international comparison [J]. *Metrologia*, 1998, **35**(3):197~202
- Mark L. Eickhoff, J. L. Hall. Optical frequency standard at 532 nm [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, **44**(2):155~158
- C. S. Edwards, G. P. Barwood, P. Gill *et al.*. Absolute frequency stabilization of a 637 nm laser diode using Doppler-free  $\text{I}_2$  spectra [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):796~797
- Haim Lotem. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers; Comment [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18):3816
- M. de Labachellerie, H. Sasada, G. Passadat. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers; erratum. [J].

*Appl. Opt.*, 1994, **33**(18):3817~3819

8 Zhang Jian, Chen Xuzong, Wang Yiqiu. Analysis on continuous tuning range of tunable diodes lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10):1220~1224  
张 剑,陈徐宗,王义道. 外腔半导体激光器激光波长连续可调范围的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10):1220~1224

9 L. Ricci, M. Weidemuller, T. Esslinger *et al.*. A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(5):541~549

10 Jiang Pengfei, Zhao Weirui, Zhang Jinguan *et al.*. A narrow linewidth external-cavity semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2):160~161  
江鹏飞,赵伟瑞,张静娟等. 窄线宽的外腔半导体激光器[J]. *激光技术*, 2004, **28**(2):160~161

11 C. J. Hawthorn, K. P. Weber, R. E. Scholten. Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **72**:4477~4479

12 L. D. Turner, K. P. Weber, C. J. Hawthorn *et al.*. Frequency noise characterization of narrow linewidth diode lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(1-3):391~397

13 Duan Yunfeng, Zhang Jiangshui, Tian Xiaojie *et al.*. Compact and tunable diode laser with external grating feedback [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(2):181~185  
段云锋,张江水,田晓洁等. 紧凑型光栅外腔可调谐半导体激光器[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(2):181~185

14 Jianwei Zhang, Kaikai Huang, Donghai Yang *et al.*. Compact extended cavity diode laser system for small optically pumped cesium beam frequency standards [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(9):525~528

15 Zhao Weirui, Xie Fuzeng. Grating external cavity semiconductor laser used in interference measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):911~914  
赵伟瑞,谢福增. 用于干涉测量的光栅外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):911~914

16 Danial A. Steck. Rubidium 87 D Line Data Revision 0.7 [M]. <http://steck.us/alkalidata>, 21st Nov. 2002



## 6 kW 高效、高功率全固态连续波激光器

全固态激光器(DPSSL)具有体积小、重量轻、效率高、性能稳定、可靠性好、寿命长、光束质量高等优点,近年来已成为激光学科的重点发展方向之一,高功率全固态激光器在工业加工、军事和科研等领

域有十分重要的用途。本实验利用自主研制的高功率激光头,使用 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质,采用图 1 所示的三棒串接获得高功率1064 nm连续波激光输出。该激光器经过专家测试,输出功率达 6.03 kW,光-光转换效率超过 50%。

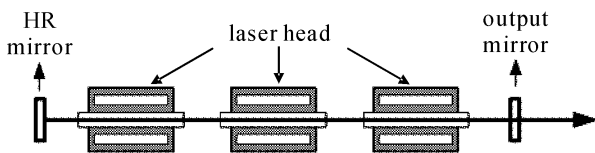


图 1 高功率全固态激光器光路图

Fig. 1 Schematic diagram of the high power DPSSL

中国科学院半导体研究所,北京 100083  
林学春,侯 玮,张 玲,  
徐贵昌,马骁宇,李晋闽  
收稿日期:2007-06-21