

# 紧凑坚固 Littman-Metcalf 型可调谐外腔 半导体激光器

魏芳<sup>1,2</sup> 陈迪俊<sup>1</sup> 辛国锋<sup>1</sup> 孙延光<sup>1,2</sup> 方祖捷<sup>1</sup> 蔡海文<sup>1</sup> 瞿荣辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 构建了一种基于 Littman-Metcalf 结构的外腔半导体激光器。该激光器采用基于星形柔性铰链转动机制的紧凑型设计, 并利用有限元分析的方法对其机械结构进行了分析及设计, 转动臂实现了高达 3.7 kHz 的基模共振频率。根据无跳模调谐条件对外腔设计进行了优化, 提高了激光器的性能。该激光器为单纵模运转, 工作波长约为 780 nm, 无跳模调谐范围大于等于 80 GHz, 且在无重新装调情况下可稳定工作一年以上, 表明激光器具有良好的可靠性。同时该激光器可锁定在 <sup>87</sup>Rb(F=2→F'=2,3) 吸收峰上, 持续时间超过 24 h, 其线宽为 200 kHz, 温度稳定度为 35 MHz/°C, 且稳频激光器的 Allen 方差在测量时间为 3 s 时可达  $3.5 \times 10^{-11}$ , 24 h 内光功率波动小于 0.75%, 具有较高的稳定性。

**关键词** 激光器; 激光技术; 外腔半导体激光器; 大范围无跳模调谐; 稳频

**中图分类号** TN248.4; TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1102012

## A Compact and Rugged Tunable External Cavity Diode Laser with Littman-Metcalf Configuration

Wei Fang<sup>1,2</sup> Chen Dijun<sup>1</sup> Xin Guofeng<sup>1</sup> Sun Yanguang<sup>1,2</sup> Fang Zujie<sup>1,2</sup>  
Cai Haiwen<sup>1</sup> Qu Ronghui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, 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** An external cavity diode laser (ECDL) with Littman-Metcalf configuration is constructed in this paper. The ECDL adopts a compact structure with a star-flexure hinge as the tuning mechanism. Its mechanical characteristics and design are analyzed and optimized by finite element calculations. The first order resonance frequency of tuning arm is measured as 3.7 kHz. The laser cavity structure parameters are designed according to the mode-hop-free tuning condition, and the performance of the ECDL is obviously improved, showing single-mode operation with mode-hopping free tuning range over 80 GHz at 780 nm. The device has been operating stably without realignment for more than one year, indicating its good ruggedness. The frequency of ECDL can be locked at <sup>87</sup>Rb (F=2→F'=2,3) transitions. The linewidth of 200 kHz and temperature stability of 35 MHz/°C are measured, and the Allen deviation reaches  $3.5 \times 10^{-11}$  in 3-s integration time. Its output power is continuously monitored with fluctuation below 0.75% for 24 h, showing with good stability.

**Key words** lasers; laser technique; external cavity diode lasers; mode-hopping free tuning range; frequency stabilization

**OCIS codes** 140.3425; 140.2020; 300.6460

收稿日期: 2013-06-28; 收到修改稿日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61108028, 61178031)

作者简介: 魏芳(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事外腔半导体激光器及其稳频技术等方面的研究。

E-mail: weifang@siom.ac.cn

导师简介: 瞿荣辉(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子器件与信息技术等方面的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引 言

可连续大范围调谐的单纵模、窄线宽半导体激光器在高精度光谱、精密测量、合成孔径雷达和相干光通信等领域都是不可或缺的元件,而外腔半导体激光器因其具有结构紧凑、效率高、寿命长、光谱特性优良、波长可调谐等优点而受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。采用衍射光栅作为反馈元件的外腔半导体激光器(ECDL)具有单纵模运转和窄线宽的特性,并且波长选择灵活,因而应用广泛<sup>[2-9]</sup>。光栅反馈外腔半导体激光器一般采用两种结构:Littrow型与Littman-Metcalf型。Littman-Metcalf型结构在工作过程中出射光的方向不会随着波长调谐而改变,并且在同等条件下,Littman-Metcalf型激光器的线宽一般优于Littrow型,故实际应用中大部分采用Littman-Metcalf型外腔半导体激光器。

目前常用的Littman-Metcalf型外腔半导体激光器主要利用机械臂控制反馈元件的方法对工作波长进行调谐;其较高加工和装调精度来确保激光器的波长调谐精度及无跳模调谐范围等工作性能。但在许多应用领域中,激光器的环境适应性和长期可靠性已成为与激光器的技术性能同等重要的设计特性。目前已有多个公司的商用产品出售,比如德国Toptica公司的DL100和DL100pro系列,Sacher公司的TEC500&520和TEC120系列,美国Newfocus公司的TLB6700和TLB6900系列等。在几个常用波段(765~781 nm,1520~1570 nm,632.5~640 nm)达到了最优140 GHz的无跳模调谐范围,线宽小于500 kHz,调谐速率可达1.5 kHz<sup>[10]</sup>。但这些商用激光器由于机械调谐臂的共振频率较低(一般在2 kHz左右),存在较严重的频率噪声。美国国家航空航天局(NASA)的喷气推进实验室针对这一缺点,通过提高机械臂刚度的方法将其基模共振频率提高到了6 kHz,且无跳模调谐范围大于125 GHz<sup>[11]</sup>。

对Littman-Metcalf型外腔半导体激光器的机械结构及光路进行了仿真及优化,调谐机构采用星形柔性铰链与底座的一体化设计,将其基模共振频率提高到了3.7 kHz。该激光器无跳模调谐范围大于等于80 GHz,在无重新装调的情况下正常工作时间长达一年以上。该激光器的频率可以锁定在<sup>87</sup>Rb的F=2→F'=2,3交叉吸收峰上;测量得到线宽为200 kHz,温度稳定度为35 MHz/°C;表征频率稳定度的Allen方差达到 $3.5 \times 10^{-11}$ (测量时间为3 s)。器件的各项指标已达到国际先进水平。

## 2 激光器系统设计

Littman-Metcalf型外腔半导体激光器的结构如图1所示。激光二极管产生的光束经准直透镜准直后,在光栅处发生衍射,一级衍射光经过全反射棱镜反射后原路反馈回激光器的有源区。这样光栅、全反射棱镜及激光二极管的后反射端面共同构成了新的谐振腔。光栅的零级衍射光作为激光输出。微调棱镜的反射角度,可使光栅一级衍射光的中心波长发生变化,从而调谐激光器的输出波长。为减小激光二极管腔模式的影响,其前端面一般蒸镀减反射膜。

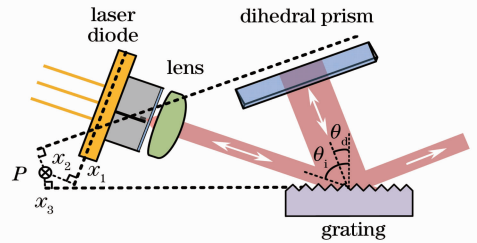


图1 Littman-Metcalf型外腔半导体激光器结构图  
Fig. 1 Schematic of the ECDL in the Littman-Metcalf configuration

### 2.1 光路设计和误差分析

为了得到大的无跳模调谐范围,需要对激光器的腔长、光栅参数、各个元件的几何位置,以及棱镜转动点的位置进行严格的设计。基本要求是,在调谐过程中由光栅及棱镜决定的反馈光的中心波长的变化,必须与由外腔腔长决定的纵模的变化相匹配,并要求光栅一级衍射谱谱宽与外腔的纵模间隔尽可能接近,这样既可以保证激光器容易起振也可以尽可能地避免跳模的发生。

在激光器的光路设计中,必须考虑激光二极管有源区、透镜及全反射棱镜的折射率等因素。图1中虚线表示的是外腔激光器的等效腔面。假定P点为全反射棱镜的转动点, $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 分别为P点到激光二极管等效后腔面、全反射棱镜等效反射面、光栅衍射表面的垂直距离,忽略空气的色散,光束在腔内传播一周后的相位可表示为<sup>[12]</sup>

$$\phi = 2k[x_1 + x_2 + x_3(\cos \theta_i + \cos \theta_d)], \quad (1)$$

$$k = 2\pi/\lambda, \quad (2)$$

$$\lambda = d(\sin \theta_i + \sin \theta_d), \quad (3)$$

式中 $\lambda$ 为激光器的谐振波长, $d$ 为光栅常数, $\theta_i$ 、 $\theta_d$ 分别为入射角及一级衍射角。由(1)式可知,理想情况下在转动全反射棱镜的过程中,只要令 $x_3 = 0$ , $x_1 = -x_2$ ,便可保持 $\phi$ 不变,从而实现无跳模调谐<sup>[12]</sup>。然而在实际应用中必然会存在一定的加工

及调整误差,并且对于较大的调谐范围还需考虑各元件色散所引起的相位变化的影响。所以可以根据实际所需要的无跳模调谐范围计算出各元件位置允许存在的误差,从而对设计和装调给出理论指导。假定空气的折射率为 1,则

$$x_1 = (n_{\text{source}} - 1)l_{\text{source}} + (n_{\text{window}} - 1)l_{\text{window}} + (n_{\text{lens}} - 1)l_{\text{lens}} + x_{\text{source}}, \quad (4)$$

$$x_2 = (n_p - 1)h_p + x_p. \quad (5)$$

式中  $n_{\text{source}}$ 、 $n_{\text{window}}$ 、 $n_{\text{lens}}$ 、 $n_p$  分别为激光二极管有源区、窗口玻璃、准直透镜及全反射棱镜的折射率,  $l_{\text{source}}$ 、 $l_{\text{window}}$ 、 $l_{\text{lens}}$ 、 $h_p$  分别为激光二极管有源区、窗口玻璃、准直透镜及全反射棱镜的通光长度,  $x_{\text{source}}$ 、 $x_p$  分别为激光二极管后端面及全反射棱镜反射棱到转动点  $P$  的垂直距离。

由于激光器最终输出的纵模由总相位  $\phi$  决定,求解  $\phi$  的变化量便能得到相对应的纵模变化情况。由于谐振频率调谐量  $\Delta\nu$  相对于激光器的谐振频率  $\nu$  来说很小,故  $\Delta\nu$  对相位的影响  $\Delta\phi$  可由  $\phi$  关于  $\nu$  的微分给出,即

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta\nu}{\lambda}.$$

$$\left\{ \frac{\Delta l}{\Delta\nu} + \frac{1}{\nu} \left[ x_1 + x_2 + x_3 \left( \cos\theta_i + \cos\theta_d + \frac{\lambda \tan\theta_d}{d} \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

式中  $\Delta l = \Delta n_{\text{source}} l_{\text{source}} + \Delta n_{\text{window}} l_{\text{window}} + \Delta n_{\text{lens}} l_{\text{lens}} + \Delta n_p h_p$  为由激光二极管、透镜、全反射棱镜色散引起的变化项,  $\Delta n$  为  $\Delta\nu$  所对应的各元件折射率的变化量。可知,如果仍按照理想情况下  $x_3 = 0$ ,  $x_1 = -x_2$  的条件进行调节,那么无跳模调谐的范围将会受到各元件折射率的影响,为此必须将元件的几何位置对色散进行预补偿,使得

$$\frac{\Delta l}{\Delta\nu} + \frac{1}{\nu} \times \left[ x_1 + x_2 + x_3 \left( \cos\theta_i + \cos\theta_d + \frac{\lambda \tan\theta_d}{d} \right) \right] = 0. \quad (7)$$

在此条件下,可得到较大的无跳模调谐范围。一般认为相位变化  $2\pi$  时会发生跳模;在计算时采用  $\pi$  作为无跳模调谐的所允许的相位变化量,可以通过(6)式对激光器设计及调整误差进行计算。

1) 无跳模调谐范围要求下,有关元件几何位置允许误差的计算。

当光栅的位置固定时,可以通过调整激光二极管及全反射棱镜的位置对光栅位置的误差进行补偿,即

$$x_1 + x_2 = \frac{c}{4\pi\Delta\nu} \left( \Delta\phi - \frac{4\pi\Delta l}{\lambda} \right) - x_3 \left( \cos\theta_i + \cos\theta_d + \frac{\lambda \tan\theta_d}{d} \right). \quad (8)$$

根据(8)式,对器件结构进行了定量设计。计算所用参数如下:激光中心波长为 780.2 nm,光栅周期为 1800 lp/mm,入射角设计为  $70^\circ$ ,激光二极管的窗口玻璃(厚度为 0.25 mm)及全反射棱镜(3.2 mm×3.2 mm×15 mm)的材料为 BK7 材料。图 2 所示为满足 100 GHz 的无跳模调谐范围所要求的元件几何位置( $x_1 + x_2$ )和  $x_3$  的计算结果,中间一条直线表示的是考虑元件色散后无跳模调谐的条件,阴影部分为允许的误差范围。由图 2 可知, $x_1 + x_2$  所允许的误差为  $\pm 0.75$  mm。

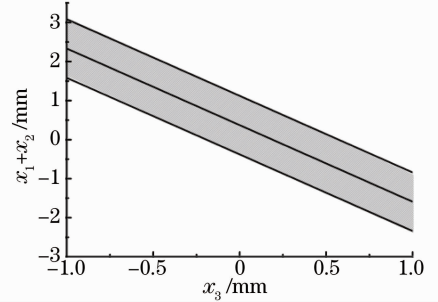


图 2 100 GHz 无跳模调谐范围下各元件几何位置的允许误差

Fig. 2 Geometrical tolerance of the components for mode-hopping free tuning range of 100 GHz

2) 无跳模调谐范围要求下,全反射棱镜转动中心位置允许误差的计算。

为了计算方便,假定激光二极管、光栅、全反射棱镜按不考虑色散的理想无跳模条件摆放,即  $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ ,如图 3(a)所示。各等效面的交点为原点(0,0),光栅所在的直线为  $x$  轴,那么激光二极管后端面所在的直线  $y_{\text{LD}}$ 、棱镜等效反射面所在的直线  $y_p$ 、光栅反射面对应的直线  $y_g$ ,可以分别表示为

$$y_{\text{LD}} = x_{\text{LD}} \tan\theta_{\text{LD}}, \quad (9)$$

$$y_p = x_p \tan\theta_p, \quad (10)$$

$$y_g = 0, \quad (11)$$

式中  $x_{\text{LD}}$ 和  $x_p$  分别为 LD 后端面所在直线及棱镜等效反射面所在直线的横坐标。

设棱镜转动点位置为( $x_0, y_0$ ),有如下几何关系

$$x_1 = \frac{x_0 \tan\theta_{\text{LD}} - y_0}{\sqrt{\tan^2\theta_{\text{LD}} + 1}}, \quad (12)$$

$$x_2 = \frac{x_0 \tan\theta_p - y_0}{\sqrt{\tan^2\theta_p + 1}}, \quad (13)$$

$$x_3 = y_0. \quad (14)$$

将(12)~(14)式代入到(8)式中,便可得到转动点需满足的无跳模调谐条件。图3(b)所示为不同的转动点位置处最大无跳模范围的等高线图,不同的颜色代表不同的转动点处的最大无跳模调谐范围。对于100 GHz的最大无跳模调谐范围, $x$ 方向允许的最大误差为 $\pm 0.5$  mm, $y$ 方向允许的最大误差为 $\pm 1$  mm。

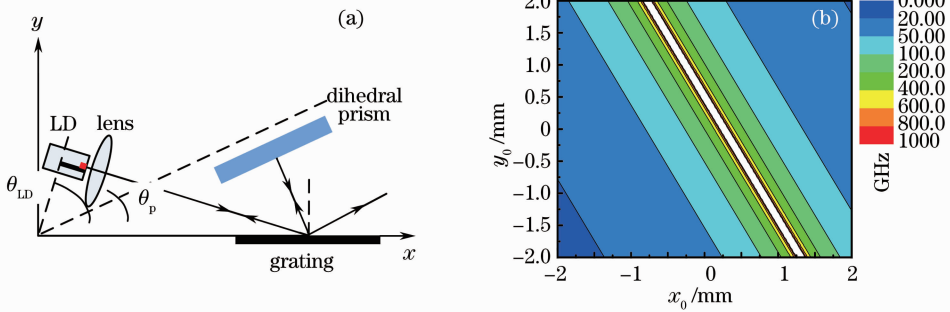


图3 (a) 理想情况下外腔半导体激光器结构图; (b) 不同的转动点位置最大无跳模范围的等高线图  
Fig.3 (a) Schematic of the ECDL in ideal conditions; (b) contour plot showing of tuning range as a function of pivot point position

## 2.2 星形柔性铰链转动机构的设计及分析

转动臂是整个激光器系统中唯一的可移动部件,如图4所示,其转动点的精度及稳定性会直接影响激光器的性能。此外,理想的转动机构还应当具有共振频率高的特点。高的共振频率不仅有利于降低外界振动的影响,而且可提高调谐的响应带宽,有利于获得更好的稳频效果。本文激光器采用如图4(a)所示的星形柔性铰链转动机构,它由6个相互对称的柔性铰链及一个转动臂组成,转动中心点在柔性铰链的交点处,转动臂由压电陶瓷(PZT)推动。利用ANSYS11.0 workbench有限元计算程序对该结构进行了分析。结构采用殷钢材料制备。图4(b)为计算网格图。在不考虑PZT的情况下,ANSYS计算所得的一阶共振频率为2.4 kHz,模态的振动方向为 $x$ 方向;二阶共振频率为7.2 kHz,模态的振动方向为 $z$ 方向;三阶共振频率为18 kHz,

由以上的仿真结果可知,为了达到尽可能大的无跳模调谐范围,应该按(7)式所示的关系对元件的位置进行调整,在100 GHz的无跳模调谐范围要求下,各位置所允许的误差为 $\pm 0.75$  mm,对转动点的精度要求为 $x$ 方向的误差为 $\pm 0.5$  mm, $y$ 方向的误差为 $\pm 1$  mm。

模态振动方向 $y$ 方向。

激光器调谐要求预留的PZT的放置空间略小于其实际长度,实际转动臂处于预应变状态。以形变量为 $5 \mu\text{m}$ 的情况进行了仿真计算,图4(c)所示为转动臂的形变情况。由图4(c)可知,转动中心点位于几何中心点处,转动臂远端最大位移为 $11 \mu\text{m}$ 。模态分析表明, $y$ 、 $z$ 方向的振动模态与无PZT的情况类似。 $x$ 方向模态的共振频率与PZT的刚度有关,PZT的刚度越大该模态下的共振频率越高。刚度为 $24 \text{ N}/\mu\text{m}$ 时计算得到共振频率为 $8.8 \text{ kHz}$ ,大于 $z$ 方向模态的共振频率。考虑到刚度很大的极限情况时 $x$ 方向的模态退化为以PZT与转动臂接触点为转动中心的振动,共振频率为 $24 \text{ kHz}$ 。因此,合适地选择PZT的刚度可以有效地提高系统的基模共振频率,这对于保证器件的稳定性是十分重要的。

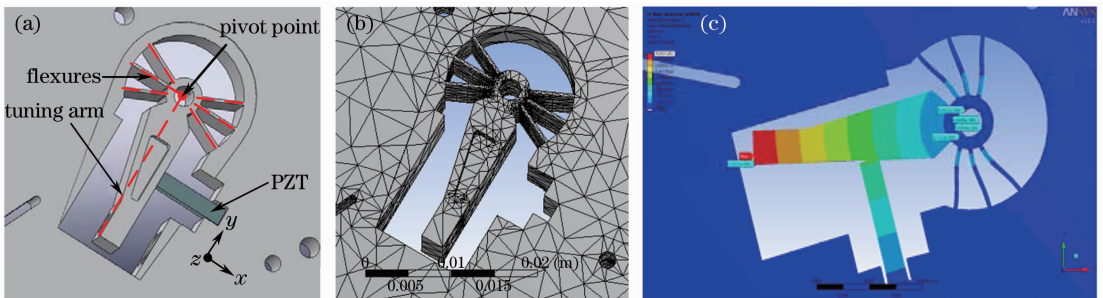


图4 (a) 星形转动臂结构; (b) 有限元模型; (c) PZT施加预应力后结构的形变图

Fig.4 (a) Schematic diagram of the star-flexure tuning arm; (b) finite element modal; (c) deformation with pre-strained PZT



### 3 激光器的基本性能测试

图 5 为根据以上设计原理搭建的激光器实物照片。该激光器主要由基座、激光二极管固定模块、全反射棱镜固定架、光栅座等部件构成。所有部件都采用热膨胀系数很小的殷钢材料加工。采用电火花线切割方法将星形柔性铰链转动机构加工到尺寸为  $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  的底座上。对激光二极管与基座进行

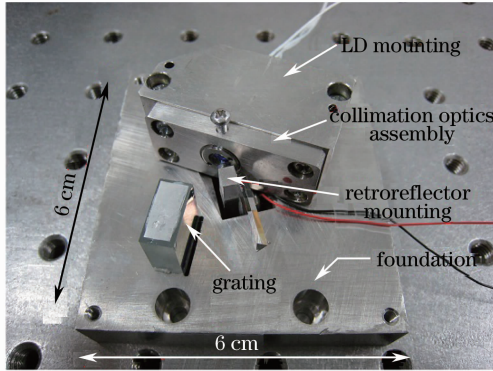


图 5 外腔半导体激光器实物照片  
Fig. 5 Photograph of the ECDL

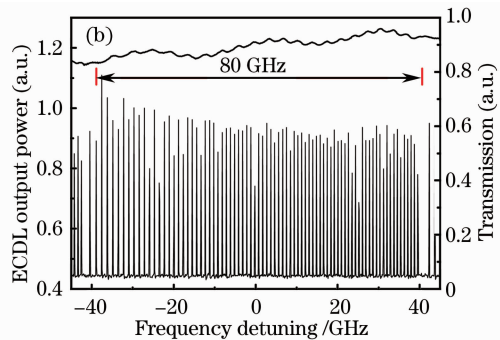
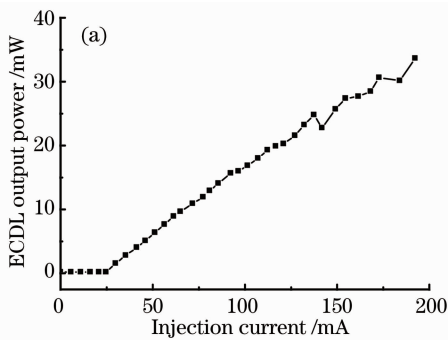


图 6 (a) 外腔半导体激光器的  $P-I$  曲线; (b) 扫描 F-P 测得的纵模(下部)和输出光功率(上部)随 PZT 驱动的变化  
Fig. 6 (a)  $P-I$  curve of ECDL; (b) longitudinal modes measured by scanning F-P etalon (lower) and the output power fluctuation (upper), varied with PZT tuning

### 3.2 转动臂谐振特性

星形柔性铰链转动臂的振动特性,是系统的调谐、反馈特性及机械稳定性的重要因素。用信号发生

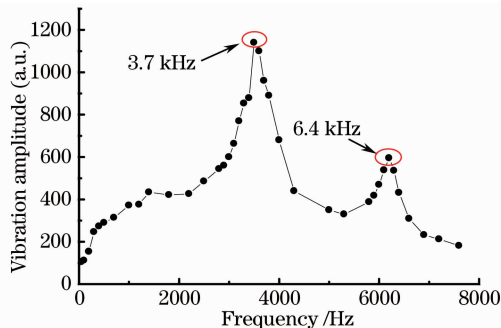


图 7 星形柔性铰链频响特性

Fig. 7 Frequency response of star-flexure tuning arm

温控,以避免工作时产生的热量导致的频率漂移。最后将外腔半导体激光器放入一个  $10.5\text{ cm} \times 10.5\text{ cm} \times 5.5\text{ cm}$  铝制密封壳体里避免受到外界声音与温度变化的干扰。在激光器装调完成后对激光器的工作性能进行了测试。

### 3.1 功率-电流曲线及无跳模调谐范围的测量

在温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,激光器的工作波长为  $780.3\text{ nm}$ ,  $P-I$  曲线如图 6(a) 所示,可得阈值电流为  $23.5\text{ mA}$ ,在额定工作电流  $190\text{ mA}$  下输出功率为  $35\text{ mW}$ 。保持激光器工作电流  $120\text{ mA}$  不变,用  $0\sim 70\text{ V}$  的三角波电压驱动 PZT,用 DL 100 扫描 F-P 标准具(Toptica 公司,自由光谱范围为  $1\text{ GHz}$ ) 测量激光器的工作频率;同时对激光器的功率进行监测,如图 6(b) 所示。由图 6(b) 可知,在调谐过程中,激光器的功率变化平稳没有突变,表明没有发生跳模;测试结果表明,无跳模范围达  $80\text{ GHz}$  以上。激光器在无重新装调的情况下正常运行了一年时间,其出光功率、频率、无跳模调谐范围等性能无明显变化。

器将一个频率从  $1\text{ Hz}$  变化到  $1.0 \times 10^4\text{ Hz}$  的正弦波加载到 PZT 的驱动电压,同时对转动臂的振动幅度进行监测,振动幅度与信号频率关系如图 7 所示。由图 7 可知,转动臂在  $3.7\text{ kHz}$  和  $6.4\text{ kHz}$  处发生共振;基模共振频率高于市场可获得的商品性能。

### 3.3 温度特性

为了检验外腔半导体激光器的温度稳定性,将稳频运转下的激光器放入温控箱内,监测激光器的频率变化量。图 8 所示为温控箱温度从  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  时激光器的频率漂移情况。激光器的输出光功率监测表明,在此范围内无跳模发生。可得温度调谐系数为  $35\text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$ 。

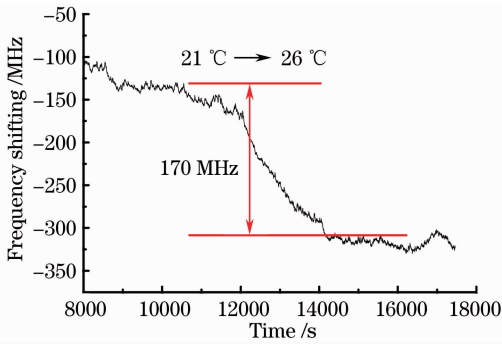


图 8 ECDL 工作频率随环境温度的变化

Fig. 8 Frequency of ECDL varied with ambient temperature

### 3.4 线宽测量

采用外差法测量了稳频运转下激光器的线宽。将两台频率差为 2 MHz 同类激光器的输出导入外差光路,产生的拍频用 PDA36A-EC 探测器(Thorlabs 公司)进行探测;所获得的拍频信号进入频谱分析仪(Anritsu MS610B 型)中进行分析,结果如图 9 所示。扫描时间为 200 ms,进行 8 次平均,对测得的功率谱作洛伦兹拟合,如图 9 中红线(彩图请见电子版)所示。测得 3 dB 带宽为 400 kHz,故每一台激光器对应 200 kHz 的线宽。

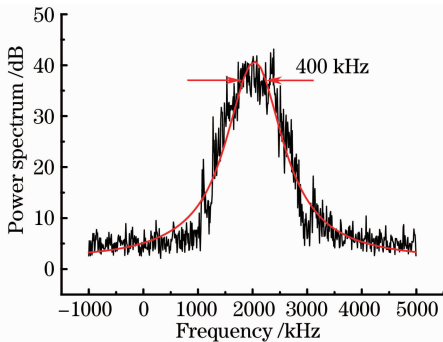


图 9 两台独立的稳频激光器拍频得到的功率谱  
Fig. 9 Spectra of beat signal of identical ECDLs

## 4 激光器的稳频

可调谐外腔半导体激光器在激光冷却与囚禁原子,量子频标等前沿科学方向具有广泛的应用。这些领域中均需将激光频率稳定在原子的某条吸收线上,本文采用饱和吸收光谱技术将激光器频率锁定在 Rb 的  $D_2$  线上。所采用的稳频系统如图 10 所示。输出的激光首先经过法拉第隔离器防止光反馈影响激光器的输出模式,接着用  $\lambda/2$  波片(HWP)、偏振分束器(PBS)分为两束,大部分作为输出光用于后续的实验及测量,小部分传输至典型的饱和吸收谱探测装置中用于激光器的稳频。用数字信号处

理器(DSP)控制激光器的启动及稳频,系统开启时,DSP 控制激光器的驱动电流和系统的温度达到设定的值。激光器的驱动电路是一个可调的精密恒流电路,电流的 40 h 短期稳定度为  $\pm 1.0 \times 10^{-3}$  mA,长期稳定度(一个月)为  $\pm 0.1$  mA,温控电路可达到 0.35% 的长期温度稳定性。系统采用电流调制获取偏差信号的方法实现稳频。激光器电流的调制频率为 200 kHz,在 Rb 泡吸收池后取得饱和吸收的偏差信号,经过 DSP 控制的数字比例积分(PID)程序,反馈到激光器的偏置电流和 PZT 的驱动电压上,从而实现激光器的频率锁定。图 11 所示为所得到的 Rb 的  $D_2$  线的饱和吸收谱及误差信号。可以得到 PZT 与工作电流的波长调谐系数分别为 851 MHz/V, 116 MHz/mA。

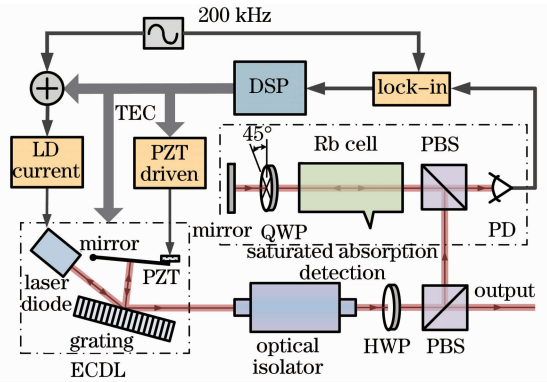


图 10 稳频系统结构

Fig. 10 Schematic diagram of ECDL stabilization system

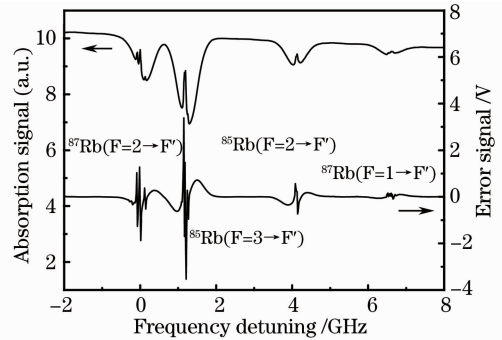


图 11 Rb 的  $D_2$  线的饱和吸收光谱及相对应的误差信号

Fig. 11 Saturated absorption spectrum and error signal of Rb hyperfine transition  $D_2$  line

激光器的频率稳定度是实际应用关注的重要参数。将上述线宽测量外差装置获得的拍频信号用频率计数器(53131A counter 型,Agilent)测量,通过 GPIB 接口和 IntuiLink 采集软件,对两台激光器的频率差进行测量分析,得到的 Allen 方差如图 12 所示。可知,在积分时间为 3s 时激光器的频率稳定度达到  $3.5 \times 10^{-11}$ ,对应的频率漂移为 10 kHz。该结

果满足激光冷却与囚禁原子,量子频标等应用的对激光器的要求。在实验室条件下,激光器的频率可以连续锁定工作 24 h 以上,并且输出光功率波动小于 0.75%。如果对整个稳频系统采取温控,磁场隔离及减震措施,激光器的频率稳定度还会得到进一步的提高。

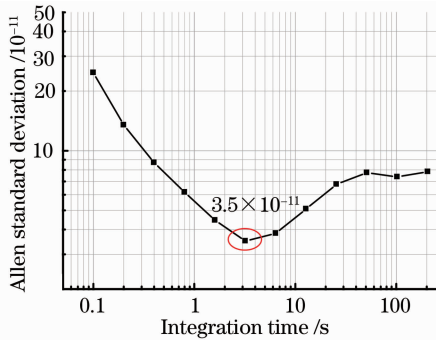


图 12 频率稳定度的 Allen 方差测量曲线

Fig. 12 Allen deviation of the frequency stabilized ECDL

## 5 结 论

报道了采用星形柔性铰链调谐结构的 Littman-Metcalf 型外腔半导体激光器。对激光器各元件的几何位置和调谐过程的允许误差进行了分析计算,采用有限元分析的方法对转动机构的机械特性进行了仿真。根据计算结果设计制备了具有大无跳模调谐范围的坚固紧凑型外腔半导体激光器。激光器采用与底座的一体化设计,有效地提高了调谐机构的共振频率,经测定转动臂机械结构的基模共振频率提高到了 3.7 kHz。实验结果表明,单纵模无跳模调谐范围达到大于 80 GHz;稳频运转激光器的频率锁定在<sup>87</sup>Rb 的  $F=2 \rightarrow F'=2,3$  交叉吸收峰上;测量得到线宽为 200 kHz,温度稳定度为 35 MHz/°C。表征频率稳定度的 Allen 方差为  $3.5 \times 10^{-11}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Wei Fang, Sun Yanguang, Chen Dijun, *et al.*. Tunable external cavity diode laser with a PLZT electrooptic ceramic deflector[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2011, 23(5): 296–298.
- 2 N P Robins, A Lance, J D Close, *et al.*. Piezo-locking a diode laser with saturated absorption spectroscopy [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(28): 5163–5166.
- 3 L Ricci, M Weidemüller, T Esslinger, *et al.*. A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics [J]. *Opt Commun*, 1995, 117(5-6): 541–549.
- 4 Sang Eon, Park K Taeg Yong, Eun-joo Shin, *et al.*. A compact extended-cavity diode laser with a Littman configuration [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, 2003, 52(2): 280–283.
- 5 Tong Zhou, Xianghui Qi, Qing Wang, *et al.*. Frequency-stabilized diode laser at 780 nm with a continuously locked time over 100 h[J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(5): 496–498.
- 6 Bo Lu, Thibault Vogt, Xinxing Liu, *et al.*. High-performance laser power feedback control system for cold atom physics[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(9): 091403.
- 7 Jun Ruan, Jie Liu, Jie Ma, *et al.*. Robust external cavity diode laser system with high frequency stability for Cs atomic clock[J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(3): 300–302.
- 8 Li Liping, Xiong Guisheng, Chen Jingbiao. Commercialized series of external cavity diode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s1): 54–57.
- 李利平, 熊桂生, 陈景标. 首批系列化国产外腔半导体激光器 [J]. *光学学报*, 2008, 28(s1): 54–57.
- 9 Chen Wenlan, Yuan Jie, Qi Xianghui, *et al.*. Design of 780 nm external cavity semiconductor laser and higher harmonic frequency stabilization[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(7): 895–900.
- 陈文兰, 袁 杰, 齐向晖, 等. 外腔半导体激光器设计与高次谐波稳频[J]. *中国激光*, 2007, 34(7): 895–900.
- 10 Newport Corporation. TLB-6900 Vortex™ II Tunable Lasers [EB/OL] [2013-05-25]. <http://search.newport.com/i/1/nav/1/q1/Lasers/q2/Tunable%20Diode%20Lasers/q3/TLB-6900%20Vortex%20II%20Precision%20Tuned%20Lasers/x1/section/x2/chapter/x3/family>.
- 11 NASA's Jet Propulsion Laboratory. Rugged, Tunable Extend-Cavity Diode Laser [EB/OL] [2013-05-25] <http://www.techbriefs.com/component/content/article/1927>.
- 12 P McNicholl, H J Metcalf. Synchronous cavity mode and feedback wavelength scanning in dye-laser oscillators with gratings[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(17): 2757–2761.

栏目编辑:张 腾