

# 基于二次谐波特性的DFB激光器稳频新方法研究

梅教旭, 汪磊\*, 谈图, 刘锬, 王贵师, 高晓明

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 大气物理化学研究室, 安徽合肥 230031

**摘要** 窄线宽稳频激光器在工业生产控制中具有广泛的应用, 但自由运转的半导体激光器的频率漂移限制了激光器的使用。为稳定半导体激光器的频率, 提出了一种基于二次谐波吸收特性来实现窄线宽二极管激光器的稳频新方法, 利用  $1.396 \mu\text{m}$  的DFB二极管激光器测量水汽的二次谐波信号来实现激光的稳频, 实验结果表明在 100 h 内激光器输出波长漂移有效的抑制在  $\pm 0.16 \text{ pm}$  范围内, 激光稳频后, 其吸收峰的位置不随环境温度的变化而漂移。该方法具有简单、可靠等优点, 对二极管激光频率的稳定具有广阔的应用前景。

**关键词** 激光光学; 稳频; 二次谐波; 分布反馈激光器; 比例微分控制器

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)10-2989-04

## 引言

近年来, 可调谐半导体激光吸收光谱<sup>[1-2]</sup> (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 技术被广泛应用于环境监测<sup>[3]</sup>、燃烧诊断<sup>[4]</sup>、天然气泄漏检测<sup>[5]</sup>、痕量气体成分分析<sup>[6]</sup>等诸多领域。然而在实际应用中, 特别是长时间连续运行过程中, 激光器的输出频率受外界环境变化(温度、湿度、震动等)的影响会造成频率的漂移, 特别是外界环境温度的变化对激光器输出频率的影响尤为严重。目前比较实用的半导体激光器稳频技术主要有光反馈稳频技术、直接电控稳频技术, 以及混合稳频(光反馈和电反馈相结合的稳频方法)等。光反馈稳频指的是利用相干或者非相干光反馈进行稳频。直接电控稳频技术<sup>[7]</sup>是利用反馈电路对激光器的驱动电流、温度或者其他被控对象[如电压陶瓷(piezoelectric ceramic transducer, PZT)]等进行反馈来稳频。传统稳频方法<sup>[8]</sup>通常采用分束器结合参考池的方法, 利用一次谐波信号或三次谐波信号作为反馈控制信号将激光器的输出频率稳定在特定的吸收峰上。如利用该方法设计的频率锁定装置使得激光器稳定在  $\pm 0.001 \text{ cm}^{-1}$  范围内; 利用该方法设计的装置在 9 h 内使得激光器波长漂移在  $1.2 \text{ pm}$  内。但是这种方法要求检测系统多出一个分束器、参考吸收池、探测器以及锁相放大器, 不仅增加了系统的成本, 而且使得系统的结构复杂。

本研究基于波长调制吸收光谱技术, 创新性地提出了利用二次谐波吸收特性的稳频新方法, 并基于该方法建立了一套DFB激光器稳频装置, 在连续监测 100 h 时间内, 其波长漂移有效地控制在  $\pm 0.16 \text{ pm}$  范围内。该装置较传统稳频方法结构更为紧凑, 无需分束器及参考吸收池(同时还减少了一路探测器及锁相放大器), 并且有效抑制了外界环境变化对激光器输出频率的影响。

## 1 原理

二极管激光输出可以通过改变激光器温度和注入电流对激光输出进行调制, 注入电流的表达式可描述为

$$I(t) = I_c + I_a \sin(\omega t) \quad (1)$$

式(1)中  $I_c$  是中心注入电流,  $I_a$  是正弦波调制振幅,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  是正弦波调制频率。由此可以得出激光器输出的瞬时频率为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + \nu_a \cos(\omega t) \quad (2)$$

式(2)中  $\bar{\nu}$  为激光中心频率,  $\nu_a$  为调制振幅。又频率调制振幅  $\nu_a$  与注入电流  $I_a$  的调制振幅线性度有关, 有  $\nu_a = k_{\nu, ic} I_a$ ,  $k_{\nu, ic}$  是激光频率随注入电流变化的系数。激光器的注入电流同时也会影响激光器的出射功率, 因此在对二极管激光器进行调制时, 不仅激光频率被调制而且激光器输出电流  $I(t)$  也同时被调制。

$$I(t) = k'_{I, ic} [i_{ic}(t) - i_{th}] + h''_{I, ic} [i_{ic}(t) - i_{th}]^2 \quad (3)$$

收稿日期: 2015-02-12, 修订日期: 2015-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175036)资助

作者简介: 梅教旭, 1987年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: 740812114@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: wanglei@aiofm.ac.cn

式(3)中  $k'_{l,i}$  是注入电流与激光功率响应的线性项系数,  $k''_{l,i}$  是注入电流与激光功率响应的非线性项系数,  $i_{th}$  是激光发射电流的阈值。

当调制频率振幅比吸收谱线线宽小得多的时候,即在调制振幅  $\nu_c \ll 1$  条件下,探测器接收的信号经锁相放大,得到  $n$  次谐波信号的表达式通过在激光中心频率  $\nu_c$  附近的泰勒展开,其  $n$  次谐波信号可描述为式(4)

$$\begin{aligned} \bar{S}_n(\bar{\nu}_c, \bar{\nu}_a, \theta_n) &\approx \bar{S}_n(\bar{\nu}_c, \bar{\nu}_a \ll 1, \theta_n) \cos \theta_n = \\ &- \eta I_i \frac{2 - \delta_{n0}}{2^n n!} \bar{\nu}_0 \bar{\chi}^{(n)}(\bar{\nu}_c) \alpha_0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\bar{\chi}^{(n)}(\bar{\nu}_c)$  是激光中心频率为  $\bar{\nu}_c$  时所求的线型函数的  $n$  阶导数。由此可知,在小的调制振幅下,锁相放大器的输出  $n$  次谐波信号正比于线型函数的  $n$  阶导数,正比于吸收系数  $\alpha_0$ ,锁相放大器输出的偶次谐波信号的幅值随探测阶数的增加而减小,为获得最大的信噪比,选择二次谐波信号作为所需要的探测信号。

在理想情况下,当注入电流与设定工作温度保持不变时,DFB 激光器的输出频率保持稳定,即在上升沿与下降沿上的二次谐波信号峰与峰之间的间距  $\Delta d$  应保持固定(如图 1 所示)。然而在实际运用中,特别是长时间连续运行过程中,激光器的输出频率受外界环境变化(温度、湿度、震动等)的影响会产生频率的漂移,特别是外界环境温度的变化对激光器输出频率的影响尤为严重,严重时激光频率会远离吸收峰。因此在本工作提出了利用激光器注入电流的上升沿和下降沿产生的两个吸收峰作为反馈控制信号,选取峰 1 与峰 2 之间的间距作为变量值(Variation),设定值(Set Point)与变量值(Variation)之间的差值作为反馈控制所需的误差信号(Error Signal)。

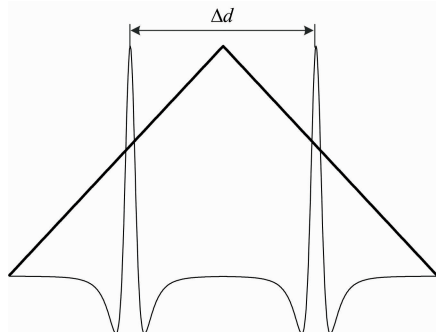


图 1 基于二次谐波吸收特性来实现二极管激光器的稳频新方法

Fig. 1 Based on second harmonic absorption characteristics of new methods to realize the diode laser frequency stabilization

## 2 实验部分

实验装置如图 2 所示,光源采用波长为  $1.396 \mu\text{m}$  的 DFB 二极管激光器,输出功率为  $7.5 \text{ mW}$ 。利用自行设计的电流和温度控制器驱动 DFB 激光光源。探测器将检测到的信号送至锁相放大模块,并解调出所需要的二次谐波信号,计算机采集该信号后进行分析处理,计算出稳频所需的误差信号(Error Signal)并经由模拟 PID 及运放反馈至激光电流

控制器,从而实现对激光器输出波长的闭环反馈控制。

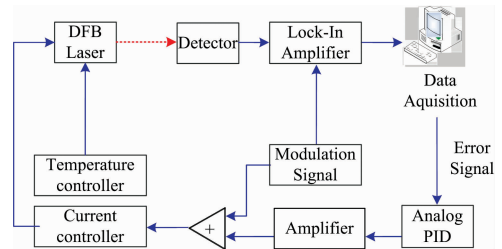


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

## 3 结果与讨论

将激光器注入电流与工作温度设定在恒定值( $I_{set} = 70 \text{ mA}$ ,  $T_{set} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ),并利用波长计(Buleigh-WA-1500,最小分辨率  $0.1 \text{ pm}$ )监测激光器在不同外界温度下的输出波长值,以及在外界环境温度变化情况下激光输出波长的长时间稳定性。由图 3(a)可知,在外界环境温度素定的情况下激光器的输出波长相对稳定。在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时,激光器输出中心波长为  $1396.3708 \text{ nm}$ ,并稳定在中心值  $\pm 0.0007 \text{ nm}$  范围内,标准偏差为  $SD = \pm 2.22 \times 10^{-4}$ 。外界环境为  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  时,激光器输出中心波长为  $1396.3699 \text{ nm}$  并稳定在中心值  $\pm 0.00065 \text{ nm}$  范围内,标准偏差  $SD = \pm 1.79 \times 10^{-4}$ ,但激

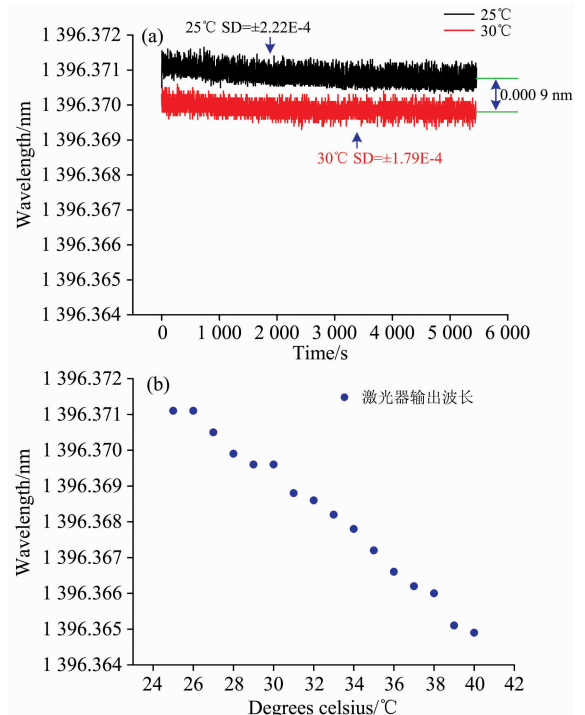


图 3 激光器在不同温度环境中频率稳定性

(a): 25 与  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  波长漂移; (b): 不同温度下波长漂移

Fig. 3 Frequency ability of the DFB laser in different temperature environment

(a): Wavelength drift under the temperature conditions of  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

(b): Wavelength drift under different temperature conditions

光器中心输出波长较 25 °C 时下降了 0.000 9 nm。利用高低温试验箱，以 1 °C 为步进记录下 25~40 °C 区间内的外界环境温度变化与激光器输出波长变化的关系，如图 3(b) 所示，由图 3(b) 可知随着外界环境温度的升高，激光器输出波长呈下降趋势。

采用标准的 61 Hz 的三角波叠加 7.5 kHz 的正弦波作为调制信号用以驱动 DFB 激光器，激光器输出的中心波长设定在水汽 1.396 μm 的吸收峰位置，激光器环境温度工作为 25 °C，探测器接收到的直接吸收信号与锁相解调出的高低温柜内水汽二次谐波信号如图 4 所示，由图 4 可知，在作为波长扫描的三角波的上升沿与下降沿均能解调出气体吸收的二次谐波信号，此时上升沿与下降沿吸收峰的间距为 1 308 个采样点，将此数据作为稳频控制的设定值(SetPoint)，而实时采集的两峰间距值作为反馈变量(Variation)。Variation 与 SetPoint 的差值即为 PID 稳频控制环节所需的误差信号(Error Signal)，即反馈控制值。

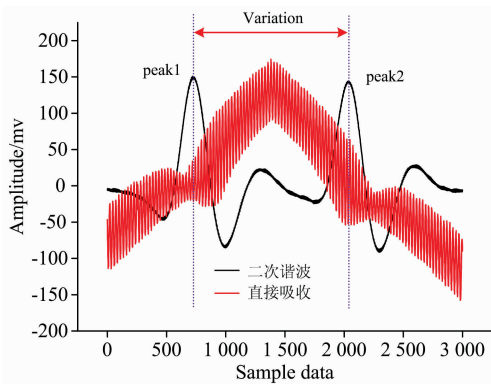


图 4 波长调制扫描通过吸收峰

Fig. 4 The 2f-absorption signal by wavelength modulation

记录下激光器在 1 396 nm 附近水汽吸收的二次谐波信号变化与不同环境温度的关系，如图 5 所示。由图 5 可知随着环境温度的升高，上升沿部分的二次谐波信号向右逐渐偏移，下降沿部分的此信号向左偏移，两峰呈合拢趋势。不同温度下的峰值高度的变化是由于外界温度升高而导致高低温柜内水汽浓度降低引起的。由图 5 可知，外界环境温度为 25

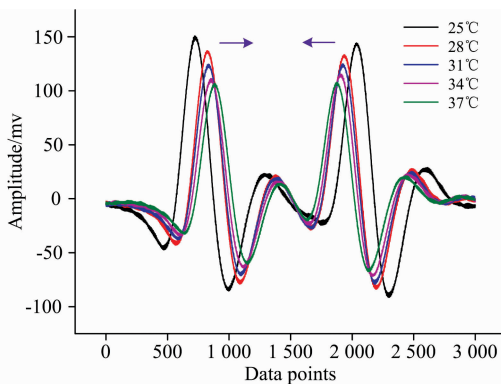


图 5 不同温度环境中二次谐波信号

Fig. 5 The 2f-absorption signal under different temperature environment

和 37 °C 时，该激光器输出波长分别为 1 396.371 1 和 1 396.366 2 nm，对应波长变化 0.004 9 nm，两波峰采样点位置分别为 728 和 881，对应间隔为 153 个采样点，由此计算出每个采样点对应的波长变化约为 0.032 pm。

采用高低温试验箱模拟外界环境温度的变化(由室温 25 °C 升温至 40 °C)，实时记录上升温过程中波形的变化情况以及实时的峰峰值间距，在未开启稳频控制的情况下，峰峰值间距由 1 308 采样点减少为 1 125 采样点，峰峰值间距减少了 183 个采样点，如图 6 所示。在相同的实验条件下，开启稳频控制后，峰峰值的间距稳定在设定值附近，波动仅为 ±5 个采样点。

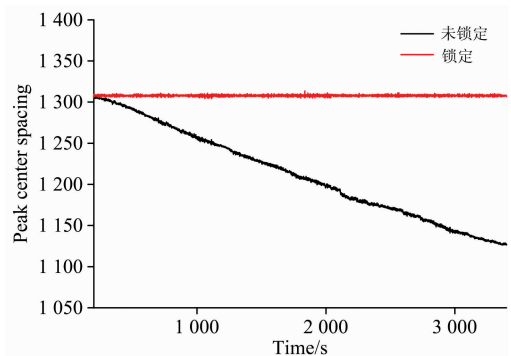


图 6 稳频开启与未开启时二次吸收信号间距变化

Fig. 6 The change of spacing between 2f-absorption signal under the condition of the ON and OFF states

为了进一步验证长时间的稳频效果，先让系统连续自由运转约 100 h 后，再开启稳频控制继续运行 100 h(整个实验阶段内室温自由变化区间为 18~25 °C)，如图 7 所示。在开启稳频控制情况下，峰峰值间距的波动仅为 ±5 个采样点，其对应的波长漂移仅为 ±0.16 pm。

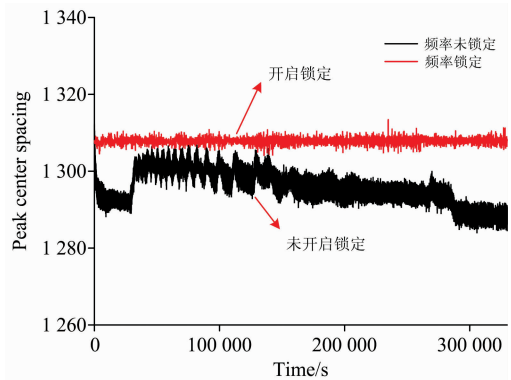


图 7 稳频开启与未开启实验结果

Fig. 7 The experimental results for the ON and OFF states

## 4 结 论

基于波长调制吸收光谱技术，创新性地提出了利用二次谐波吸收特性的稳频新方法，基于该方法建立了一套 DFB 激光器稳频装置，该装置无需参考池及分束器，使得系统更为紧凑、可靠。该装置不仅实现了激光器频率输出的长时间

稳定, 并且有效地抑制了外界环境变化对激光器输出频率的影响(尤其是温度变化), 其波长漂移有效地控制在  $\pm 0.16$  pm 范围内。激光器输出频率稳定后, 其吸收峰的位置不随环境温度的变化而漂移, 并且当采用采样率更高的采集卡进行吸收峰的间距采集时能够更加有效地提高激光器输出频率

的稳定性。同时如果选用其他波长的激光器作为光源, 采用本套装置也能很好的实现激光器输出频率稳定。本方法为基于二极管激光吸收光谱技术的气体传感器实现长时间外场监测提供了有效的技术保障。

## References

- [ 1 ] Reid J, Labrie D. Appl. Phys. B, 1981, 26(3): 203.
- [ 2 ] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K. Appl. Phys. B, 2005, 81(5): 711.
- [ 3 ] ZHANG Ke-ke, QI Yong, FU Xiao(张可可, 齐 勇, 付 晓). Optoelectronic Technology(光电子技术), 2014, 34(4): 300.
- [ 4 ] Chen Jiuying, Liu Jianguo, He Yabai, et al. Acta Phys. Sin. , 2013, 62(22): 224206.
- [ 5 ] WANG Lei, TAN Tu, WANG Gui-shi(汪 磊, 淡 图, 王贵师). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2010, 37(11): 2912.
- [ 6 ] Aizawa T. Appl. Opt. , 2001, 40(27): 4894.
- [ 7 ] Tom Ahola, Hu Jianpei, Erikki Ikonen. Meas. Sci. Technol. , 1998, 69(5): 1934.
- [ 8 ] SUN Yan-guang, DONG Zuo-ren, YE Qing(孙延光, 董作人, 叶 青). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2013, 39(7): 0702009.

## A New Method of DFB Laser Frequency Stabilization Based on the Characteristics of the Second Harmonic

MEI Jiao-xu, WANG Lei\*, TAN Tu, LIU Kun, WANG Gui-shi, GAO Xiao-ming

Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract** Frequency stabilized laser with narrow line width has an extensive application in the industrial production control. However, the Frequency variation of free working semiconductor laser limits the use of laser device. To stabilize the frequency of semiconductor laser, this paper presents a new way which is based on second harmonic absorption characteristics to achieve frequency stabilization of narrow line width diode laser. We have measured the second harmonic signal of water vapor with DFB diode laser of  $1.396 \mu\text{m}$ , and the results show that laser output wavelength drift in 100 hours has been effectively controlled within  $\pm 0.16$  pm. The absorption peak doesn't vary with environmental temperature after frequency stabilization. This method is simpler and more reliable and has broad application prospects for frequency stabilization of diode laser.

**Keywords** Laser optics; Frequency stabilization; Second harmonic; Distributed feedback laser; Proportion integral differential controller

(Received Feb. 12, 2015; accepted Dec. 7, 2015)

\* Corresponding author