

文章编号: 1005-5630(2015)02-0122-05

## 调制与非调制的半导体激光器 典型稳频方法对比分析

孙 黎, 李慧琴, 熊继军

(中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 针对半导体激光器稳频技术中的饱和吸收法、塞曼调制法、基于原子二向色性的激光器锁定(DAVLL)法和去除多普勒背景的二向色性锁定(DFDL)法4种典型稳频方法进行了稳定性、操作性、抗干扰能力等方面的对比分析, 概括了调制和非调制稳频方法的优缺点, 为相关实验选择合适的稳频方法提供依据。

**关键词:** 半导体激光器; 稳频; 频率调制; 非调制

**中图分类号:** TN 249 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.02.007

### The comparative analysis of frequency stabilization methods between modulation and non-modulation semiconductor laser

SUN Li, LI Huiqin, XIONG Jijun

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Frequency stabilization technology of semiconductor laser has developed rapidly in recent years, and it is the basic technology in laser used in the experiment. The comparative analysis of several frequency stabilization methods, which are saturated absorption, Zeeman modulation, dichroic-atomic-vapor laser lock (DAVLL) and doppler-free dichroic lock (DFDL), were proposed for stability, operational, anti-interference ability and so on. Their advantages and disadvantages of the modulation and non-modulation frequency stabilization methods are also been summarized in order to provide references to select the most suitable frequency stabilization method for the related experiments.

**Keywords:** semiconductor laser; frequency stabilization; frequency modulation; non-modulation

### 引 言

窄线宽、高稳定度<sup>[1-2]</sup>的半导体激光器在原子光谱学、量子计量学、光纤通信以及激光原子冷却等光电子学领域有日益广泛的应用。在实验条件下, 稳定度的高低、稳频系统的繁简程度以及操作的难易与否等往往是选择稳频方法的重要依据。因此, 对半导体激光器稳频技术的研究很有意义和应用价值。

收稿日期: 2014-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(041815050)

作者简介: 孙 黎(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事特种传感器方面的研究。E-mail: 541160680@qq.com

通信作者: 熊继军(1971—), 男, 教授, 主要从事动态测试技术与微纳传感器方面的研究。E-mail: xiongjijun@nuc.edu.com

## 1 基本原理

自由运转的激光器由于易受外界温度变化、大气变化、机械振动以及磁场变化的影响,激光器输出光频率是不稳定的。为了改善输出光频率的稳定性,必须使用电子稳频系统对激光器进行控制。稳频时需要选取一个稳定且不因外界干扰而改变外部参考频率,对于大多数半导体激光器,都能找到一个相应的原子或分子吸收谱线作为参考频率。当外界干扰使激光输出频率偏离参考频率时,可以通过一定技术手段对激光频率偏移进行鉴别而得到鉴频信号,由稳频系统控制电路输出控制信号,调节半导体激光器的腔长或电流,使激光器的频率回复到参考频率而达到稳频的目的。激光器稳频基本原理如图1所示。

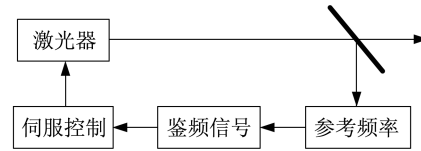


图1 激光器稳频基本原理  
Fig. 1 Frequency stabilization system

## 2 半导体激光器带调制的稳频方法

### 2.1 饱和吸收稳频

图2为饱和吸收稳频原理图<sup>[3]</sup>,激光经过光隔离器后进行分束,分成三束激光。其中的两束激光在Rb原子泡中形成泵浦光,另外一束激光直接透过Rb原子泡。用光电探测器PD分别对两路光信号进行探测,泵浦光的探测信号中包含多普勒吸收信号和饱和吸收信号,透过光的探测信号中只包含多普勒吸收信号。将探测到的两路信号作差,可以去除信号中的多普勒背景。最后将不含多普勒背景的饱和吸收信号通过锁相放大电路、稳频系统控制电路,加到激光器压电陶瓷上来调节激光器的输出频率,使得激光器输出频率稳定。

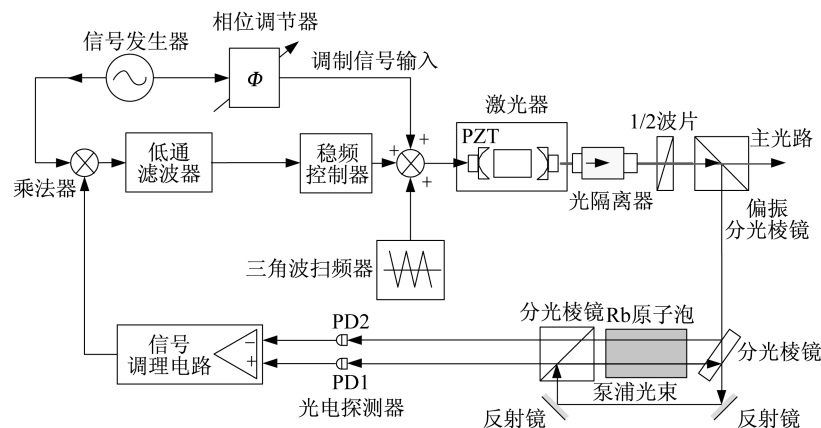


图2 饱和吸收稳频原理

Fig. 2 Saturated absorption frequency stabilization system

饱和吸收稳频法稳定度较高,可达 $10^{-11} \text{ s}^{-1}$ <sup>[3]</sup>,系统抗干扰能力较强。但需锁相环,系统闭环操作较复杂,直接将调制信号加到激光器上(内调制),与三角波扫频信号和伺服控制系统的电压信号进行叠加,一起送往激光器两端的压电陶瓷(PZT)上,给激光器频率造成额外扰动。

### 2.2 塞曼调制稳频

图3为塞曼稳频光路,从半导体激光器中出射的是线偏振光,经过1/2波片、偏振分光棱镜(PBS)、1/4波片后,完成激光的分束,并把进入Rb原子泡的光束变成圆偏振光。之后经过一个厚玻璃片,将圆偏振光分成三束光。其中的两束光对射完成饱和吸收作用,另一束光是探测光。光束在输出到光电探测器之前,要经过一个分光棱镜,这里选择的是消偏振分光棱镜(BS),因为消偏振分光棱镜虽然对光能量有一定的吸收,但对光的偏振态不敏感,出射激光的偏振态和入射激光的偏振态相同。

如图 4 所示,塞曼调制稳频实验系统可分为扫频发生器、输入放大器、锁相放大器、信号处理器四部分。其中扫频发生器主要功能是给激光器加三角波扫描信号,使激光器频率移动。因为在经过 Rb 泡得到饱和吸收曲线后,即确定了锁频的频率基准,则需要通过扫频将激光器频率移动到该基准频率附近,在实验中就是要在示波器上找到饱和吸收谱线。输入放大器包括信号放大和信号偏置,并且可以滤除多普勒背景信号,通过调节可以将吸收曲线维持在采样范围内,不失真。锁相放大器包括信号发生器、混频器、低通滤波器。其中信号发生器是给混频器提供本地参考信号,给线圈提供调制信号;混频器一般是通过乘法器实现,将带有调制的饱和吸收信号与本地参考信号进行混频、解调,这里运用到导数谱技术;低通滤波器是将相乘后信号中的高频信号滤除。信号处理器采用 PID 控制,接受鉴频信号,产生相应的控制信号输出给激光器的压电陶瓷。

塞曼调制稳频法将调制信号加载到线圈上,采用外调制稳频,不会对激光器频率造成额外扰动,稳定度较高,数量级可达  $10^{-12} \text{ s}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。但是该方法也需锁相环,闭环伺服控制较复杂,受外界干扰较大。

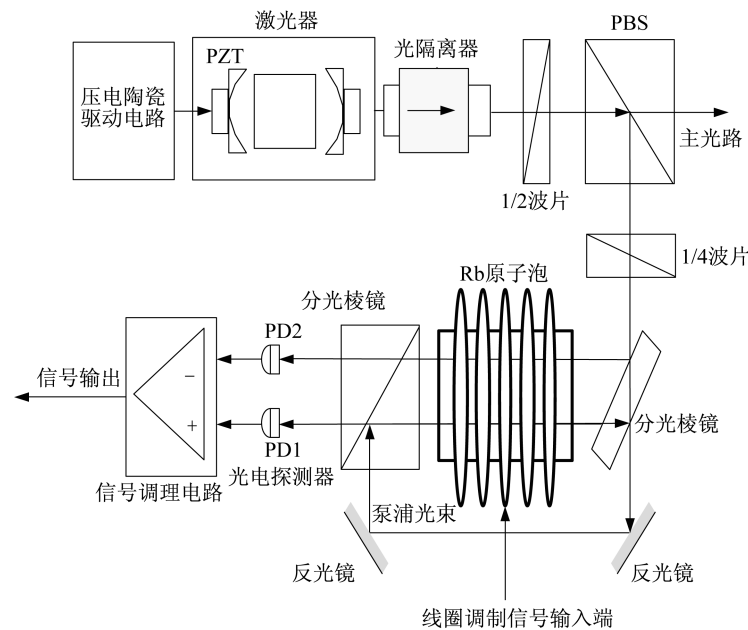


图 3 塞曼调制稳频光路<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Zeeman modulation frequency stabilization light path

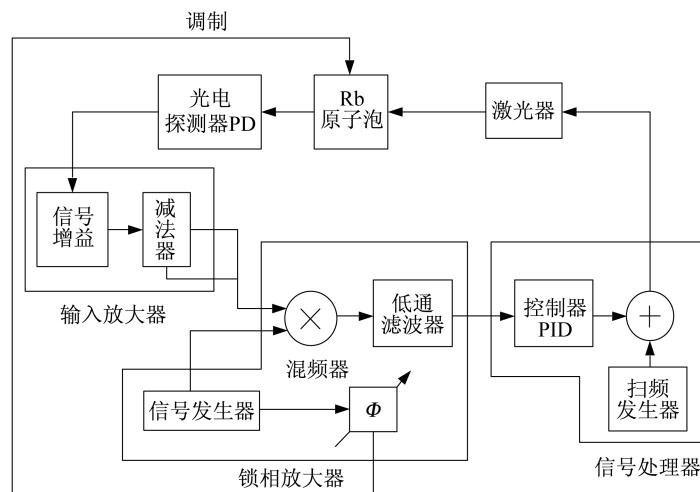


图 4 塞曼调制稳频原理

Fig. 4 Zeeman modulation frequency stabilization system

### 3 半导体激光器无调制的稳频方法

#### 3.1 DAVLL(dichroic-atomic-vapor laser lock)稳频法

该方法利用原子在磁场中的塞曼效应,实验原理如图 5 所示<sup>[5]</sup>。DAVLL 称呼是由 JILA(Joint Institute for Laboratory Astrophysics)<sup>[6]</sup>创造的。将原子吸收室放入磁场中,线偏振光可视作由强度相同、旋转方向相反的两束正交圆偏振光组成,当沿磁场方向传播时,由于塞曼效应,原子的吸收线分成左旋圆偏振光 $\sigma^+$ 和右旋圆偏振光 $\sigma^-$ ,并且在频率上沿相反方向偏移<sup>[7]</sup>。通过 1/4 波片和偏振分光棱镜后,可把两束正交圆偏振光分开,由两个光电探测器分别探测,最后将两路探测信号相减,得到相应的鉴频曲线,如图 6 所示<sup>[5]</sup>。

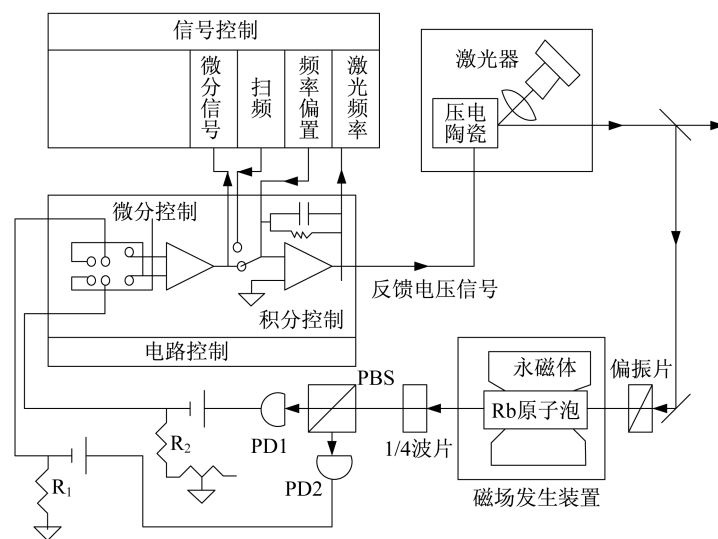


图 5 DAVLL 稳频原理  
Fig. 5 DAVLL frequency stabilization system

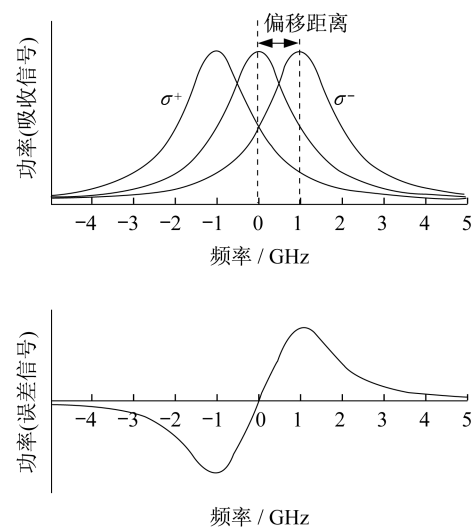


图 6 误差信号  
Fig. 6 Error signal

DAVLL 稳频法属于无调制稳频<sup>[8-9]</sup>,不会对激光频率造成额外干扰,方案简单易行,无需锁相放大器,能获得无调制扰动的激光输出,连续可调谐范围宽于饱和吸收法的可调谐范围。但 DAVLL 需要对应特定的吸收谱线,适用范围有限,没有消除多普勒展宽,稳定度不高,约为 $10^{-9}$ 量级<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 DFDL(doppler-free dichroic lock)稳频方法

DFDL<sup>[10-11]</sup>稳频法是在 DAVLL 稳频法的基础上做了改进。增加一束泵浦光,如图 7 所示,能消除多普勒展宽背景,使得吸收信号更加平稳。利用偏振光在磁场作用下发生左旋和右旋现象,将一束线偏振光分成两束旋向相反的圆偏振光,再通过 1/4 波片和 PBS 将这两束圆偏振光分开。

DFDL 稳频法系统结构简单,不需要锁相环,操作方便且易于实现。DFDL 消除了多普勒展宽,具有相对较宽的信号范围。然而 DFDL 也需对应特定的吸收谱线,调谐范围比 DAVLL 有所减小<sup>[12]</sup>;对磁场强度敏感,磁场强度大小对误差信号斜率影响很大;锁频精度不高,约为 $10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 。

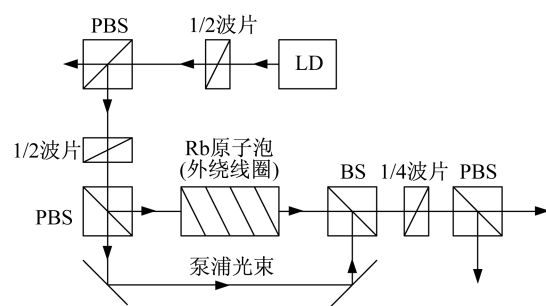


图 7 DFDL 稳频原理  
Fig. 7 DFDL frequency stabilization system

## 4 结 论

上述稳频方法均日趋成熟,以某一频率作为参考来稳频是目前国内外半导体激光器稳频的常用方法。从调制方法看,直接对激光器进行频率调制会引入额外的频率噪声,造成激光频率抖动,但是短期稳定度相对较高;外调制和无调制的稳频方法不会给激光器带来频率扰动,而且实验系统简单,容易搭建,虽然稳定度相对较低,但已基本达到激光器相关实验的要求。对外调制和无调制的稳频方法进行优化,逐步提高其稳定度是日后研究工作的努力方向。

### 参考文献:

- [1] 郑甜美,袁其平,童峥嵘,等. 半导体激光器稳频技术的研究进展[J]. 光通信技术,2011,35(4):30-33.
- [2] 韩顺利,作欣,林强. 半导体激光器稳频技术[J]. 红外与激光工程,2014,42(5):1189-1193.
- [3] 薛洪波. 半导体激光器稳频系统研制及其在原子干涉仪中的应用[D]. 北京:中国地质大学,2009.
- [4] 陈旭. 基于塞曼调制法的半导体激光器稳频系统研究[D]. 北京:北京科技大学,2010.
- [5] YASHCHUK V V, BUDKER D, DAVIS J R. Laser frequency stabilization using linear magneto-optics[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(2):341.
- [6] CORWIN K L, LU Z T, HAND C F, et al. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor[J]. Applied Optics, 1998, 37(15):3295-3298.
- [7] CHERON B, GILLES H, HAMEL J, et al. Laser frequency stabilization using Zeeman effect[J]. Journal of Physics III, 1994, 4(2):401-406.
- [8] PETELSKI T, FATIORI M, LAMPORESI G, et al. Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking[J]. The European Physical Journal D, 2003, 22(2):279-283.
- [9] BEVERINI N, MARSILI E, MARSILI P, et al. Frequency stabilization of a diode laser on the Cs D2 resonance line by the Zeeman effect in a vapor cell[J]. Journal of Applied Physics B, 2001, 73(2):133-138.
- [10] WASIK G, GAWLIK W, ZACHOROWSKI J, et al. Laser frequency stabilization by Doppler-free magnetic dichroic[J]. Journal of Applied Physics B, 2002, 75(6/7):613-619.
- [11] TIWARI V B, MISHRA S R, RAWAT H S, et al. Laser frequency stabilization and large detuning by Doppler-free dichroic lock technique: Application to atom cooling[J]. Pramana, 2005, 65(3):403-411.
- [12] 陈长水,王芳,刘颂豪,等. 半导体激光器稳频技术综述[J]. 量子电子学报,2010,27(5):513-521.

(编辑:张 磊)