

以原子谱线作参考的半导体激光器的频率锁定*

满文庆** 杨世琪 钟旭滨 孙番典
(华南师范大学物理系, 广州, 510631)

摘要: 研究以原子谱线作参考的半导体激光器的频率锁定系统, 在精密控制半导体激光器的工作温度和工作电流的基础上, 利用 ^{85}Rb 的 D_2 线的一次微分信号对 LD 的频率进行锁定。锁定后 LD 的频率最大变化为 $10\text{MHz}/3\text{h}$, 平均取样时间 10s , 用 Allan 方差估算 LD 频率稳定度为 10^{-9} 。

关键词: 半导体激光器 锁频 稳定度

Frequency of LD locked to the atomic spectrum line

Man Wenqing, Yang Shiqi, Zhong Xubin, Sun Fandian

(Department of Physics, South China Normal University, Guangzhou, 510631)

Abstract: This paper described a laser diode frequency stabilization system composed of a precisely temperature control system and a operating current control system of the laser diode. Using the first differential signal of the resonance line, the operating frequency of the laser diode can be locked to D_2 line of ^{85}Rb . The measurement results show that the frequency stability evaluated by Allan variance is 10^{-9} order for 10 seconds sampling time.

Key words: semiconductor laser frequency-locking stability

引 言

从 1962 年第一台半导体激光器(LD)诞生以来, 半导体激光器有了很大的发展, 由于具有频率可调谐, 能快速调制, 易工作在单模以及体积小, 价格便宜, 可在室温工作等优点, 半导体激光器广泛地应用在光纤通信, 数据存储, 高分辨率光谱学, 等离子体的诊断以及激光测量, 激光定位等许多领域。近年来, 对 LD 的研究及应用方面都有了很大的发展, 高稳定度的 LD 广泛地使用在光纤通信频分复用系统中; 利用微波调制的 LD 已直接观察到铷原子基态超精细能级间的相干共振^[1]; 利用脉冲调制的 LD 可观察到塞曼能级的相干共振, 高稳定度的 LD 还可作为全光学化的原子频标用的激光源^[2]。

但是, 许多很重要的应用都要求半导体激光器的频率比较稳定。比如在光纤通信的频分复用技术中^[3], 频率漂移会引起“串扰”(Crosstalk)和增加系统的误码率。另外, 在激光准直系统中, 频率漂移将会带来大的误差。在光信息处理方面, 也要求 LD 的频率比较稳定, 所以 LD 的稳频是一个很有意义且很有应用价值的课题, 国内外都开展了这方面的研究^[4~6]。

可以通过控制工作温度和注入电流的稳定性来实现 LD 一定程度的频率稳定。但要获得更高的稳定度, 则要在在此基础上, 进一步采用 LD 的锁定稳频技术^[8], 即采用一个外部参考(基准)频率, 使激光器的频率锁定在这个基准频率上。比较有趣的是, 几乎所有的半导体激光器都能找到一个合适的原子或者分子的吸收谱线作为参考频率来实现锁频。

* 广东省高教厅科研基金资助。 ** 现在广州师范学院物理系任教。

一、原理简述

图 1 是整个锁频的原理图。如图所示, LD 的工作温度和注入电流经精密控制后, 再使其注入电流有一个小的调幅, 从而 LD 的频率有一个小的调频, 用锁相放大器的输出信号(即吸收谱线的一次微分信号)作为负反馈信号, 经过电子自动调节器加到 LD 电流驱动电路上, 控制注入电流的大小, 从而实

现把 LD 的频率锁定到了吸收谱线上。假设由于 LD 的工作温度和电流的微小变化引起 LD 的频率偏离吸收谱线中心, 吸收谱线的一次微分信号将会增大或减小, 此信号作为负反馈信号去控制 LD 的电流, 使得 LD 的频率拉回吸收谱线中心, 即把 LD 的频率锁定到了吸收谱线上, 从而实现 LD 的高稳定度的频率稳定。

铷原子有两种同位素, 分别为⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb, 天然的铷中, ⁸⁵Rb 的丰度是 72.2%, ⁸⁷Rb 的丰度为 27.8%。在本实验中, 就是用这种天然的铷吸收泡。⁸⁵Rb, ⁸⁷Rb 原子第一激发态与基态之间的跃迁所对应的光谱包括两个精细结构成分 D₁ 和 D₂ 线, 其中每一条线又分裂为两条超精细结构能级 A 和 B, 见图 2。在实验中, 铷吸收泡的温度恒定在 50℃左右。用铷原子的吸收谱线作为参考频率来锁定 LD 的频率。如果铷吸收泡中充以不同气压的缓冲气体, 则吸收线的频率将会有变化, 则可得到可调谐的、高稳定度的半导体激光器。

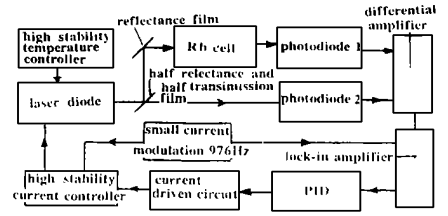


Fig. 1 Block diagram of the LD frequency locked to the rubidium resonance absorption spectral line

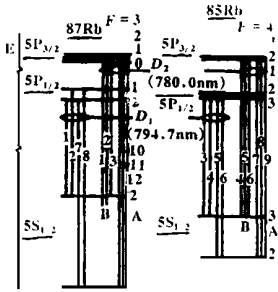


Fig. 2 Atomic energy level diagram of the rubidium

二、实验及结果

1. 温度和电流的稳定度

文献[7]介绍, 半导体激光器的频率随温度和电流的变化关系分别是 60GHz/℃, 6GHz/mA。⁸⁵Rb 原子的共振吸收谱线线宽约为 600MHz。因此, 为了将 LD 的频率锁定到⁸⁵Rb 原子的共振吸收谱线上, 必须把电流稳定到 μA 数量级, 温度稳定到 mK 数量级。

我们使用三菱公司生产的 ML4102, 设计了功率自动控制电路(APC) 来实现 LD 的恒流。为了提高 LD 工作温度的长期稳定性, 我们采用二级自动控温电路(ATC), 一级控温是指 LD 工作温度, 二级控温是指 LD 工作温度的外层温度。一级温度变化 5mK, 二级温度变化 50mK。其中第一级控温精度较高。我们采用相敏检波技术(PSD) 来探测温度变化, 同时在电路中加了电子自动控制器(PID)。LD 工作温度的短期稳定度为 1mK/10min; LD 工作温度的长期稳定度为 5mK/3h。LD 可工作在与室温相差 ±20℃(MAX) 的温度范围内, 在与室温相差 ±15℃内的任意温度点都可稳定的工作, 即使在室温附近也可稳定的工作。在参考文献[7]的基础上, 我们设计精密控制半导体激光器的工作电流的电路, 该电路可安全的工作, 不用减小 LD 的工作电流就可开关机, 可以把 LD 的工作电流控制在 1μA/10min, 2μA/4h。LD 工作电流的短期稳定度为 1μA/10min; LD 工作电流的长期稳定度为 ±1μA/3h。

2. LD 的频率锁定

我们使用的 LD 的标称值: 24℃时, $I_{th} = 41\text{mA}$, $I_{op} = 51\text{mA}$, 波长 779nm, 功率 3mW。控制

LD 工作温度在 28℃, 工作电流在 51mA 时, 对 LD 进行扫频, 当 LD 的频率扫过 Rb 原子⁸⁵Rb, ⁸⁷Rb 的四个跃迁频率时, 示波器上相应有四个微小的吸收峰。恒定 LD 的温度, 并使用差分电路消去扫描电流引起的倾斜的功率背景, 同时改用三角波电压慢扫描(周期为 20s), 用记录仪即可记录四条谱线。对 LD 的频率有一个小的调频, 经过调制的共振吸收谱线信号放大后加到锁相放大器上, 并用相同频率的信号作为锁相放大器的参考信号, 这时锁相放

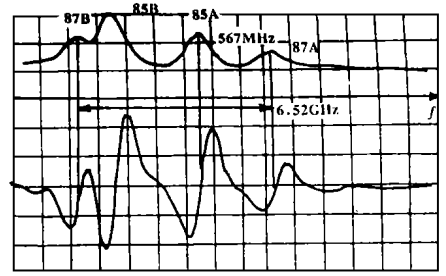


Fig. 3 The absorb spectrum of the rubidium D₂ line and its first differential signal

大器的输出信号即是吸收谱线的一次微分信号。

87B, 85B 两线基本上重合在一起, 不适合用来锁定 LD 的频率, 根据文献[8], 87A 线的温度频移是 -101.8kHz/℃, 比其他三条线大得多, 不宜用来锁频, 所以我们就将 LD 的频率锁定在 85A 上。根据图 1 接好电路, 即可进行 LD 的频率锁定。锁定前后的频率偏移如图 4。

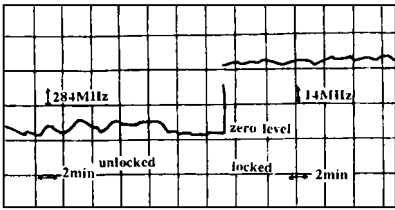


Fig. 4 The recorded trace showing the frequency stability of LD

利用鉴频曲线, 可估算 LD 频率稳定度, 平均取样

时间 10s, 用 Allan 方差估算 LD 频率稳定度, 可计算得 Allan 方差为 10^{-9} , 直接观察锁相放大器的数字表的输出, 系统可锁定长达三个多小时。三个多小时后, 温度会有变化, 或者其他因素, 系统会失锁, 用电流微调可使系统重新锁定。在我们的系统中, 鉴频效率 S 等于 10V/300MHz, 开环频差 F_k 为 300MHz, 闭环频差 F_b 约为 50MHz, 控制频差 F_c 约为 250MHz。

三、结 论

我们成功地研制出一套以⁸⁵Rb 的 D₂ 线作参考的半导体激光器频率锁定系统。实测表明, 半导体激光器的工作温度 10min 内稳定到 1mK, 4h 内 5mK, 分别相当于 LD 的频率变化 60MHz, 300MHz; 电流稳定到 1μA 达 10min, 2μA 达 2h, 分别相当于激光器的频率变化 3MHz, 6MHz。锁定之前, 半导体激光器的频率变化为 300MHz/h, 锁定后 LD 的频率最大变化为 10MHz/3h, 用 Allan 方差估计频率稳定度为 10^{-9} 。

参 考 文 献

- 1 杨世琪. 光学学报, 1994; 14(10): 1114~ 1116
- 2 杨世琪. 光学学报, 1992; 12(11): 992~ 997
- 3 王力列, 易玺林, 谢麟振. 中国激光, 1991; 18(11): 811~ 815
- 4 Yang D H, Wang Y Q. Opt Commun, 1990; 80(1): 23~ 25
- 5 王风芝, 杨东海, 王义道. 计量学报, 1994; 15(2): 155~ 157
- 6 Villeneuve B. Electro Lett, 1993; 23(20): 10~ 13
- 7 王义道, 王庆吉. 量子频标原理. 北京: 科学出版社, 1986: 160~ 164

* * *

作者简介: 满文庆, 男, 1971 年 8 月出生。硕士, 助教。现主要从事光电子技术研究和教学工作。