

文章编号: 1007 - 6654(2004)02 - 0082 - 05 \*\*\*\*

## 半导体激光器的线宽压窄及频率连续调谐

王波, 姚景芹, 武海斌, 沈云<sup>+</sup>, 谢常德, 王海\*

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西太原 030006)

**摘要:** 我们利用共焦 F - P 腔光学弱反馈技术, 实现了单模 GaAlAs 半导体激光器线宽压窄、频率锁定及连续调谐。其线宽从自由运转时的 10 MHz 被压窄到 45 kHz, 并可频率锁定于共焦 F - P 腔。实验证明, 在弱反馈情况下, 激光器的频率连续调谐范围与共焦 F - P 腔的光强反馈量近似成正比, 实现了在铷原子  $D_2$  线附近 1.2 GHz 的频率连续调谐。

**关键词:** 窄线宽半导体激光器; 共焦 F - P 腔; 反馈量; 频率调谐范围

中图分类号: O431 文献标识码: A

### 0 引言

单模半导体激光器具有频率可调谐、结构简单和易于运转等优点, 受到广泛关注。然而, 自由运转的单模半导体激光器线宽达几十 MHz, 不适合用于高分辨率光谱、激光冷却和原子的量子相干效应等研究。最近发展起来的外部光学反馈<sup>[1~7]</sup>和快速电反馈技术<sup>[8]</sup>可以压窄半导体激光器线宽, 极大地降低了半导体激光器的相位噪声, 使之成为光与原子相互作用研究的一个重要光源<sup>[9]</sup>。外部光学反馈技术包括: 光栅反馈<sup>[1,2]</sup>、平面镜反馈<sup>[3]</sup>、光纤反馈<sup>[4]</sup>、共焦 F - P 腔反馈<sup>[5~7]</sup>等。其中光栅反馈和平面镜反馈的激光器具有结构简单, 运转方便等优点。光栅反馈可使半导体激光器线宽压窄到 1 MHz 左右, 频率连续调谐范围达 5 GHz ~ 10 GHz<sup>[1]</sup>。平面镜反

馈可使激光器线宽压窄到 1 MHz 以下, 但频率连续调谐范围较小(几百兆赫兹)<sup>[3]</sup>。近年来发展起来的共焦腔反馈的方法可极大地压窄半导体激光器的线宽。几个研究组<sup>[5~7]</sup>的研究表明, 利用共焦 F - P 腔(CFP 腔)光学反馈方法可以将半导体激光器线宽压窄到几十 kHz 到几 kHz 之间, 频率连续调谐范围通常在 500 MHz 左右<sup>[5]</sup>, 如果采用电流 - 反馈相位(PZT - ) - CFP 腔长(PZT - C)同步扫描技术<sup>[6]</sup>, 可以使频率连续调谐范围达 10 GHz 左右。

本文采用文献[5]提出的 CFP 腔外部光学弱反馈方法, 实现了半导体激光器线宽的压窄和频率连续调谐。通过差拍探测技术测得激光线宽在自由运转时为 10 MHz, 在 CFP 腔外部光学弱反馈条件下激光线宽被压窄到 45 kHz。通过调节激光器电流、温

\* 收稿日期: 2004 - 04 - 27

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60325414 和 No. 60238010); 山西省自然科学基金(No. 20011030 和 No. 20031007); 山西省归国留学人员基金

作者简介: 王波(1980 - ), 男, 山西榆次人, 山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室在读硕士, 研究方向: 量子光学与非线性光学。

\* 通讯联系人 E - mail: wanghai @sxu.edu.cn

+ 沈云永久地址: 武汉大学物理科学与技术学院 湖北 武汉 430072

度以及 CFP 腔长我们将激光器的中心频率调谐至 Rb 原子的  $D_2$  吸收线上。扫描 CFP 腔长,可以使半导体激光器的频率在 Rb 原子共振吸收线附近连续调谐,实测最大调谐范围为 1.2 GHz。我们采用波片棱镜系统改变输入到 CFP 腔的功率大小,首次测量了弱反馈量 $\left[ \text{反馈量} = \frac{\text{CFP 腔反射光功率}}{\text{激光器输出光功率}} \right]$ 与激光器频率连续调谐范围的关系。我们的实验表明,在光学弱反馈条件下( $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ),激光器频率连续调谐范围与反馈量近似成正比。

## 1 理论分析

半导体激光器中的自发辐射效应会引起激光相位和强度的起伏,而这一起伏又会引起载流子密度的变化,进一步导致半导体激光介质折射率和增益

的变化,从而使半导体激光线宽较肖洛-汤斯极限<sup>[10]</sup>增加 $(1 + \epsilon^2)$ 倍<sup>[11]</sup>,即: $\Delta\nu = \nu_s(1 + \epsilon^2)$

其中 $\epsilon = \frac{\Delta n}{n}$ ,  $n$  和  $n'$  分别是折射率实部和虚部的变化量。通常情况下, GaAlAs 半导体激光器的线宽是 10 MHz ~ 20 MHz。激光通过共焦 F-P 腔透射后,可以有效地将其位相噪声压缩,并过滤掉频率中的起伏分量。理论给出的共焦 F-P 腔反馈作用的

半导体激光器线宽极限是<sup>[7]</sup>: $\Delta\nu = \left[ \frac{L_p F_{CFP}}{l_d F_d} \right]^2$ , 其

中 $\epsilon$ 为激光器功率模式耦合因子,  $L_p$  为 CFP 腔腔长,  $l_d$  为激光腔光学长度,  $F_{CFP}$  为 CFP 腔精细度,  $F_d$  为半导体激光管谐振腔的精细度。可以看到 CFP 腔腔长越长、精细度越高,越有利于激光器线宽的压窄。

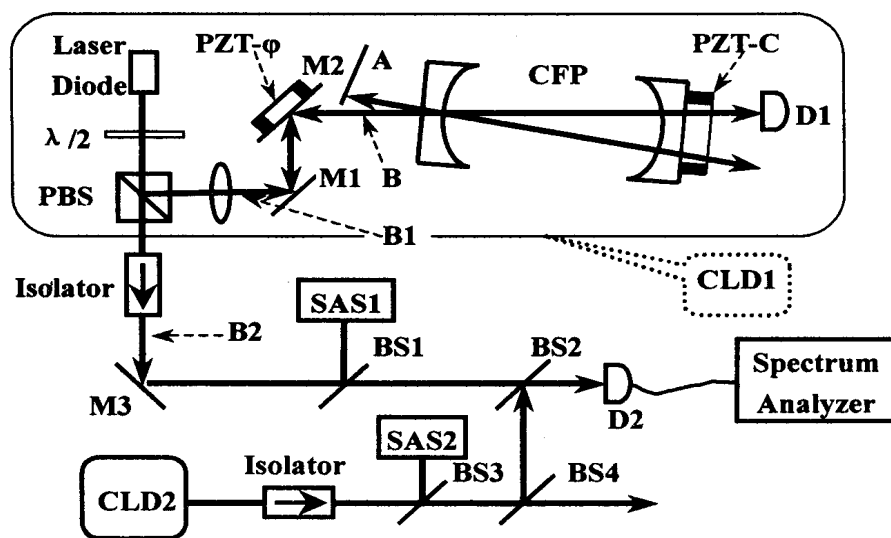


图 1 实验装置图

## 2 实验装置及结果

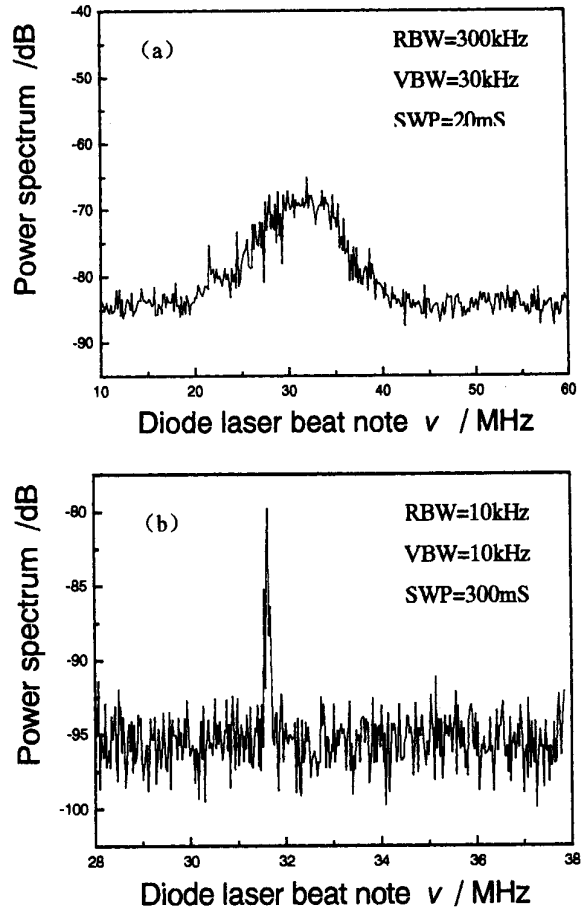
实验装置如图 1 所示,我们在实验中使用 HL-7851G 型 GaAlAs 半导体激光器,电流阈值为 37 mA,其输出的激光是单模线偏振光。最大输出功率为 40 mW,我们的工作点选择在 15 mW ~ 20 mW 之间。电流源采用美国 Newport 公司生产的 Model505 型低噪声恒流源,电流起伏小于  $2\mu\text{A}$ 。温度由美国 LX Lightwave 公司生产的 LDT-5910B 型高精度控温仪

控制,温度长期稳定性优于 0.005。我们通过选择合适的激光器工作温度和电流,把激光器频率调谐到 Rb 原子的  $D_2$  吸收线上。激光器输出的光经偏振分束镜 (PBS) 后被分成两束,一束 (B1) 被注入到 CFP 腔内,用于光学反馈。另一束 (B2) 经过隔离器后用于测量饱和吸收谱和激光线宽。通过改变 PBS 前的  $\lambda/2$  波片转角,可以调节入射到 CFP 腔前的功率,从而改变 CFP 腔的光学反馈量。M1、M2 是两个 45° 全反镜,用于准直输入到 CFP 腔的光

束。M2 镜片固定在压电陶瓷 PZT- 上,调节 PZT- 上的电压可以改变 CFP 腔反馈光束的位相,使其与激光器位相匹配。B1 光束从球面镜中心穿过进入到 CFP 腔内,并使其传播方向与 CFP 腔轴线成一个微小角度(1 左右)。光线在 CFP 腔内以如图 1 所示的 V 形筒并方式往返传播。当腔与激光频率共振时,腔内透射的光束 B 被反馈回激光器,反馈光又使激光频率与 CFP 腔保持共振(由于 F - P 腔的 Q 值远高于激光器谐振腔的 Q 值,因此激光器线宽被压窄)。CFP 腔前镜表面的直接反射光被光阑 A 挡住,以免影响激光器的稳定运转。CFP 腔的前球面镜距半导体激光器的距离  $L_d$  约为 300 mm,CFP 腔长及其两腔镜的曲率半径均为 100 mm,腔的自由光谱区为 750 MHz。两腔镜的反射率均为 96.4%。为保证激光频率的稳定性,最重要的是要使 CFP 腔长具有足够的机械稳定性。我们采用热膨胀系数小的殷钢制作成圆筒状 CFP 腔体。两腔镜密封于 CFP 腔腔体内,同时,激光器和 CFP 腔用绝热材料制成的密封罩罩住,以减小温度和气流对腔稳定性的影响,使 CFP 腔长在较长时间内保持稳定。CFP 腔后球面镜与压电陶瓷 PZT - C 粘合,在 PZT - C 上施加电压可进行腔长扫描。CFP 腔透射的光信号由探测器 D1 探测,输入到示波器中用于监视激光器频率与 CFP 腔是否共振。

实验中,我们首先调整 M1、M2 两反射镜将 B1 光束匹配到 CFP 腔内,并使 CFP 腔的反馈光耦合到激光器中。再调节加在 PZT - C 和 PZT- 上的电压,并观测探测器 D1 输出的 CFP 腔透射光信号,当该信号最大时,可确定激光器已锁定在 CFP 腔的共振频率上。我们用一台与激光器 CLD1 结构相同的激光器 CLD2 与之拍频测量激光器线宽<sup>[6]</sup>。如图 1 所示,两束激光通过一个 50% 的分束器 BS2 后叠加在一起,用光电雪崩二极管(FND100)D2 探测两激光之间的拍频信号,然后输入到谱仪(HP - 8590L)中进行信号分析。图 2 是实验结果,激光器 CLD2 工作在 CFP 腔光学弱反馈状态下,图 2(a)是激光器 CLD1 自由运转时(即无反馈)谱仪显示的拍频信号,

由此可知激光器 CLD1 自由运转时线宽为 10 MHz。图 2(b)是激光器 CLD1 也工作在 CFP 腔光学弱反馈状态下谱仪给出的拍频信号,由此可知每台激光器在 CFP 腔光学弱反馈状态下线宽被压窄到 45 kHz。



激光器 CLD2 工作在 CFP 腔光学弱反馈情况下, 而激光器 CLD1 (a) 自由运转; (b) 工作在 CFP 腔光学弱反馈情况下。

图 2 激光器 CLD1 和 CLD2 的拍频信号

在激光器 CLD1 被锁定于 CFP 腔后,将锯齿波电压加在 PZT - C 上扫描 CFP 腔长,改变 CFP 腔共振频率,我们实现了激光器在 CFP 腔光学弱反馈条件下锁定频率的连续调谐。为了获得较宽的频率连续调谐范围,应该使反馈光的相位( )在 PZT - C 扫描过程中始终保持在锁定区域内<sup>[6]</sup>,因此在扫描 PZT - C 的同时,我们也将同一锯齿波电压信号施加在 PZT- 上,并使两电压信号比例适当,保持反馈

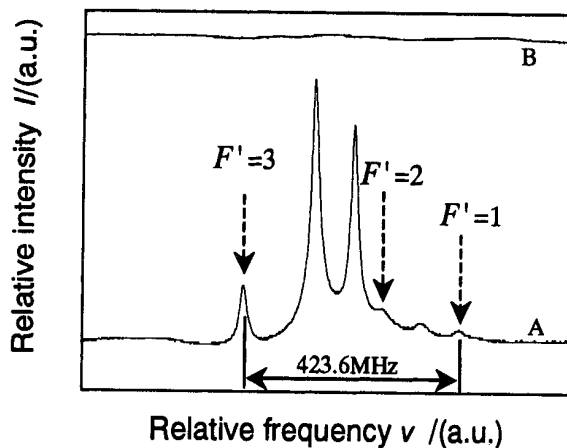
相位与CFP腔长同步变化,实现了激光器在铷原子 $D_2$ 线附近频率连续调谐。我们采用波片棱镜系统来改变反馈量,研究了反馈量与激光器频率连续调谐范围的关系。频率连续调谐范围由饱和吸收装置(SAS1)测得的饱和吸收谱来确定,反馈量用反馈光功率与激光器输出光功率的比来表示。图3是反馈量为 $1.55 \times 10^{-3}$ 时无多普勒背景的铷原子饱和吸收光谱(信号A)。谱线对应于 $^{87}\text{Rb}$ 原子 $D_2$ 线中的 $5^2S_{1/2} F=2 - 5^2P_{3/2} F=1,2,3$ 跃迁。图中除了 $F=1,2,3$ 三条超精细线外,还有三条分别对应 $5^2S_{1/2} F=2 - 5^2P_{3/2} F=1,2,3$ 跃迁过程中的三条交叉线。 $5^2S_{1/2} F=2 - 5^2P_{3/2} F=1$ 和 $5^2S_{1/2} F=2 - 5^2P_{3/2} F=3$ 之间的频率间隔为423.6 MHz<sup>[12]</sup>,由此可以推断整个谱线频率连续调谐范围达900 MHz左右。信号B是探测器D1探测到的CFP腔的透射信号,近似为一条直线,说明激光器与CFP腔在扫描过程中保持共振。我们在不同的光学反馈量情况下测量了激光器的频率连续调谐范围。测量结果如图4,从图中可以看出,激光器频率连续调谐范围与反馈量近似成正比。在反馈量为 $2.06 \times 10^{-3}$ 时,激光器频率连续调谐范围最大达1.2 GHz。再增大反馈量,激光器频率将发生跳模现象,不能稳定工作在 $^{87}\text{Rb}$ 原子的 $D_2$ 吸收线。

### 3 结论

采用共焦F-P腔外部光学弱反馈技术,实现了半导体激光器线宽压窄和频率锁定。通过差拍探测技术测得激光线宽从自由运转时的10 MHz被压窄到45 kHz。在激光器频率锁定状态下,扫描CFP腔长,实现了半导体激光器频率在Rb原子共振吸

### 参考文献:

- [1] JIN Shaozheng, LI Yongqing, XIAO Min. Single-mode diode laser with a large frequency-scanning range based on weak grating feedback [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(9): 1436-1441.
- [2] HARVEY K C, MYATT C J. External-cavity diode laser using a grazing incidence diffraction grating [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(12): 910-912.



$D_2$ 线:  $5^2S_{1/2} F=2 - 5^2P_{3/2} F=1,2,3$  跃迁

图3 无多普勒背景的铷原子饱和吸收光谱

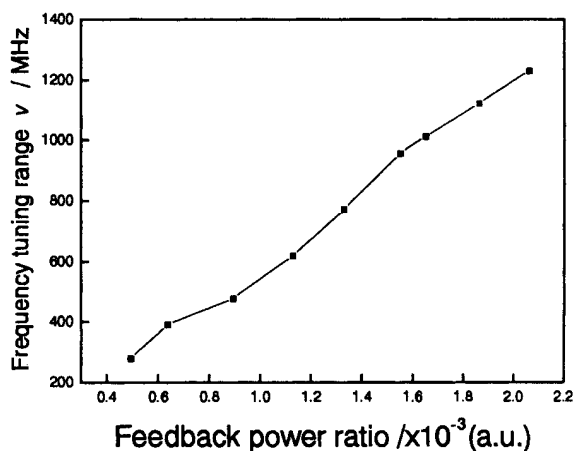


图4 激光器频率连续调谐范围与CFP腔反馈量的关系图

收线附近连续调谐,最大调谐范围达1.2 GHz。采用波片棱镜系统测量了弱反馈量与激光器频率调谐范围的关系。实验表明,在光学弱反馈条件下( $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ),激光器频率连续调谐范围与反馈量近似成正比。所研制的线宽压窄频率连续可调谐半导体激光器在光与原子相互作用的研究中具有广泛的应用。

- [3] CHEN Xuzong, YAO Jiliang, LI Yimin, *et al.* A narrow linewidth diode laser for high resolution spectroscopy and its properties [J]. *Acta Optical Sinica* (光学学报), 1996, **16**(10): 1383 - 1388.
- [4] FIQUEROA L, LAU K Y, YEN H W. Studies of GaAlAs injection lasers operating with an optical fiber resonator [J]. *J Appl Phys*, 1980, **51**(11): 3062 - 3071.
- [5] DAHMANI B, HOLLBERGL, DRULLINGER R. Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback [J]. *Opt Lett*, 1987, **12**(11): 876 - 878.
- [6] HEMMERICH A, MCINTYRE D H, SCHROPP D, *et al.* Optically stabilized narrow linewidth semiconductor laser for resolution spectroscopy [J]. *Opt Comm*, 1990, **75**(2): 118 - 122.
- [7] LAURENT P H, CLAIRON A, BRÉANT C H. Frequency noise analysis of optically self - locked diode lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1989, **25**(6): 1131 - 1141.
- [8] SCHAEFER M, MARTINI R, RICHTER S, *et al.* Experiments on linewidth reduction by fast electrical feedback [J]. *Infrared Physics and Technology*, 1996, **37**(1): 123 - 128.
- [9] WIEMAN C E, HOLLBERGL. Using diode laser for atomic physics [J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, **62**: 1 - 20.
- [10] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers [J]. *Phys Rev*, 1958, **112**(6): 1940 - 1949.
- [11] HENRY C H. Theory of the semiconductor lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1982, **QE - 18**(2): 259 - 264.
- [12] JUN YE, STEVE SWARTZ, PETER JUNGNER, *et al.* Hyperfine structure and absolute frequency of the  $^{87}\text{Rb } 5 P_{3/2}$  state [J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(16): 1280 - 1282.

## Narrowing Line width and Continuously Frequency - Tuning of a Semiconductor Laser

WANG Bo, YAO Jingqin, WU Haibing, SHEN Yun, XIE Changde, WANG Hai

*(The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto - Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)*

**Abstract :** Using the technology of the weak optical feedback from a confocal F - P cavity, we demonstrated the narrowing linewidth, frequency locking and continuously frequency - tuning of a single - mode semiconductor laser. The linewidth is reduced from 10 MHz at free running to 45 kHz with the optical feedback while the frequency is locked to the confocal F - P cavity. The continuously frequency - tuning range is linearly proportional to the feedback power ratios under the condition of the weak optical feedback, approximately. The continuously frequency - tuning range of 1.2 GHz around  $D_2$  line of Rubidium is experimentally realized.

**Key words :** narrow linewidth semiconductor laser; confocal F - P cavity; feedback power ratio; frequency tuning range