

闪耀光栅弱反馈 GaAlAs 单模半导体激光器的 频率调谐特性*

王军民 杨炜东 谢常德 彭堃堦

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

摘 要 对于单模 GaAlAs 半导体激光器, 使用一种简单的闪耀光栅外部弱反馈构型, 迫使其工作在 852.11 nm 波长处, 得到了 2.2 GHz 的频率连续调谐范围, 获得的输出功率约为半导体激光器自由运转时的 90% 以上。

关键词 GaAlAs 单模半导体激光器, 闪耀光栅, 外部弱反馈, 频率调谐。

1 引 言

单模半导体激光器在自由运转时, 一般可以通过改变温度和注入电流来对其输出激光的中心频率(波长)进行粗略的调谐。对于商售的折射率波导型单模 GaAlAs 半导体激光器而言, 温度调谐率约为 0.25 nm/°C, 注入电流调谐率约为 3 GHz/mA; 温度升高或者注入电流增大, 激光中心频率(波长)变化的总体趋势是向低频(长波)方向移动。若在较大的频率范围内通过改变温度和注入电流对其输出激光频率进行调谐, 一般会发生剧烈的模式跳变, 导致频率不能被连续调谐, 而存在一些频率间隙(frequency gap)。有时所希望的激光频率区段正好会落在这种频率间隙内, 因而激光器自由运转时仅仅依靠改变温度和注入电流就无法使其工作在所需要的频率区段。

人们先后发展了多种基于外部光学反馈的技术手段, 如光栅外部反馈^[1, 2]、原子气室外部色散反馈^[3]、共焦法布里-珀罗腔反馈^[4]等等, 来解决上述问题。采用这些外部反馈技术的单模半导体激光器, 其频率调谐特性、频率稳定性、线宽等均有所改善, 在高分辨光谱和原子冷却与俘获领域^[5, 6]及非经典光场的实验研究领域^[7~9]得到了比较广泛的应用。这些外部反馈技术中, 光栅外部反馈是一种简单而又非常有效的方法。对于光栅外部反馈的情形, 根据反馈量大小与激光器输出端面反射率的比较, 可分为光栅强反馈和光栅弱反馈两种情形; 还可根据光栅外腔的不同构型分为 Littrow 和 Littman 两种方式, 对于文献[1, 5~7]采用 Littrow 光栅外部反馈的 GaAlAs 半导体激光器中, 当通过改变光栅入射角或通过改变光栅外腔长度调谐激光频率时, 输出光束的方向会随之改变; 并且闪耀光栅的损耗一般较大, 能得到的可用输出功率一般仅为激光器自由运转时输出功率的 60%~80% 左右。

* 国家自然科学基金(19774039)和山西省青年科学基金(971012)资助项目。

收稿日期:1998-06-15; 收到修改稿日期:1998-09-18

本文报道一种简单而有效的闪耀光栅 Littrow 方式外部弱反馈的单模 GaAlAs 半导体激光器,较好地解决了一般光栅外部反馈结构中通过光栅实现频率调谐时输出光束方向会发生变化的问题,同时也相对提高了激光器的输出功率利用率。

2 定性分析

实验中使用的 SDL 公司生产的 SDL-5412-H1 型折射率波导单模 GaAlAs 半导体激光器,标称波长为 849 nm,增益介质折射率为 $n = 3.6$,腔长约为 $L = 750 \mu\text{m}^{[10]}$,由此可推算得其纵模间隔约为 55.5 GHz(约 0.133 nm)。一般地 GaAlAs 半导体激光器的增益带宽为几十纳米,在增益带宽内的激光纵模很多;但对于 SDL-5412-H1 型 GaAlAs 半导体激光器,其量子阱结构与折射率光波导的结合,不仅使得输出激光束具有低像散、单横模的特点,而且在某些条件下(特定电流和特定温度、消除光反馈)可单纵模自由运转,具有线宽较窄(一般约 15~20 MHz)的特点。

对于亚多普勒铯原子高分辨率光谱研究以及铯原子的激光冷却与俘获,所希望的波长为 852.11 nm(铯原子 D_2 线),并希望半导体激光器单纵模运转,且能够在此波长值附近一定的频率范围内连续调谐。而本工作使用的半导体激光器在尽可能消除光反馈的情况下自由运转时,可以单纵模运转,但是虽然通过仔细调节温度并调节注入电流与之配合,仍无法将其波长调至 852.11 nm 处,说明所希望的波长值落在了激光器频率调谐间隙内。

考虑如图 1 所示的一种闪耀光栅 Littrow 方式外部反馈半导体激光器的结构,激光器的输出光束通过一个分束器分出一小部分以 Littrow 方式入射到闪耀光栅上,光栅的一级衍射光反向沿入射光路经分束器反馈回激光器中,激光器绝大部分功率经分束器透射输出。这样就可以通过闪耀光栅的色散反馈作用,使激光器中各纵模所获得的净增益发生变化,可能使原来处在频率调谐间隙内的纵模获得最大净增益而起振,从而迫使激光器工作在原来依靠温度和注入电流所调谐不到的频率间隙内;同时还可以通过光栅实现频率的连续调谐,既解决了一般光栅 Littrow 外部反馈结构^[1,5~7]中通过光栅实现频率调谐时输出光束方向会发生变化的问题,又可获得较高的输出功率,提高了功率利用率。

SDL-5412-H1 型半导体激光器的输出端面反射率约为 4%(振幅反射系数约为 20%),后

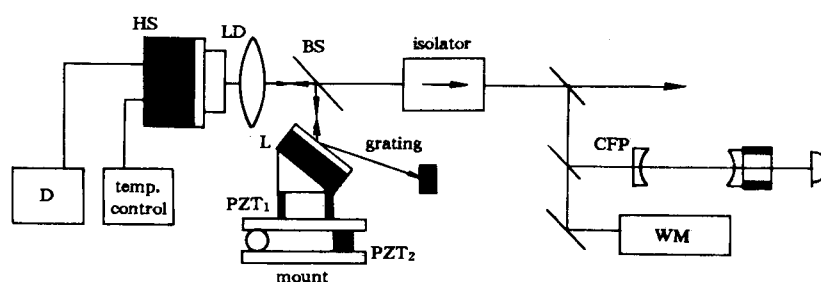


Fig. 1 Schematic of the experimental setup. LD: single-mode GaAlAs semiconductor laser; HS: heat sink; D: constant-current driver; temp. control: high-stability temperature controller; L: collimating lenses assembly; BS: beam splitter; isolator: optical isolator; grating: 1200 grooves/mm blazed grating; PZT₁: ring piezo transducer; PZT₂: piezo transducing plate; mount: two-dimension high-resolution mirror mount; CFP: scanning confocal F-P cavity; WM: wavelength meter

端面的反射率约为 94% (振幅反射系数约为 97%)^[10]。考虑 10^{-3} 量级的反馈量远小于激光器输出端面的反射率 4%，因而属于弱反馈的情形。对于每毫米 1200 线的闪耀光栅，如果入射光斑直径约为 5 mm 左右，则被入射光斑所覆盖的区域内大约有 6000 线，对应的色散带宽约为 56 GHz，与所用半导体激光器的纵模间隔 (55.5 GHz) 相近，远大于半导体激光器线宽 (15 ~ 20 MHz)。在这种情况下，考虑波长已被迫运转在希望的波长值处而仅通过改变光栅外腔长度来调谐频率时，理论中可近似忽略光栅的色散而把光栅反馈当作平面镜反馈来处理。由文献 [11] 给出的稳态时外部弱反馈半导体激光器系统输出激光频率 ω 的表达式，经过简单运算可得到系统的频率外腔腔长调谐率近似为

$$d\omega/dL' \approx -\omega/L'$$

式中 L' 为外腔腔长，注意到外腔纵模间隔 $\Delta\omega' = 2\pi c/2n_0L'$ ($n_0 \approx 1$ 为空气折射率， c 为光速)，上式可改写为

$$d\omega/dL' \approx -\omega/(\pi c/\Delta\omega') = \Delta\omega'(-2/\lambda)$$

当光栅外腔腔长变化量小于 $\lambda/2$ 时，系统的频率变化量小于一个外腔纵模间隔。外腔腔长改变量等于或大于 $\lambda/2$ 时，会导致反馈位相的反相，从而发生跳模。即仅通过改变外腔腔长所能获得的最大频率连续调谐范围小于一个外腔纵模间隔。

3 实验及其结果

实验中 SDL-5412-H1 型折射率波导单模连续 GaAlAs 半导体激光器由一个电流起伏小于 $10 \mu\text{A}$ 的低噪声恒流电源驱动，激光器温度由一个稳定度为 $\pm 0.001 \text{ C}$ 的高精度控温仪控制；使用焦距为 7.5 mm、数值孔径为 0.3 的准直透镜组 (ILX Lightwave 公司 Model 4017) 对输出激光束进行准直，使用一个隔离比接近 40 dB 的光隔离器 (New Focus 公司 Model 5568) 以消除所不希望的光反馈的影响 (参见图 1)。

为了获得所希望波长的激光，且能够在一定的频率范围内方便地调谐，并解决在一般闪耀光栅 Littrow 外部反馈结构中^[1, 5~7]当通过光栅调谐频率时输出光束的方向会随之改变的问题和可用功率相对较低的问题，实验中采用图 1 中的闪耀光栅 Littrow 方式外部弱反馈构型。经准直透镜组准直后的半导体激光束，通过一个反射率为近 10% 的 45° 分束器反射出一小部分光，以 Littrow 方式投射到闪耀光栅上，光栅衍射的一级衍射光束反向沿入射光路通过分束器反馈回半导体激光器中。由光栅与激光器输出端面组成的外腔腔长约为 50 mm。所使用的闪耀光栅参数为：尺寸 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ，每毫米 1200 线，闪耀波长 300 nm，对于 852 nm 的一级衍射角约为 30.7° ，一级衍射效率约为 20%。由半导体激光器输出端面的反射率约为 4%、准直透镜组的透射率约为 95%、分束器反射率近 10% 及闪耀光栅一级衍射效率约为 20%，可简单地估算出反馈量约为 1.3×10^{-3} ，远小于激光器输出端面的反射率，属于光栅弱反馈情形。大部分光透过分束器、光隔离器后可供使用，可用功率为激光器自由运转时输出功率的 90% 以上。

光栅通过一个 30.7° 的斜劈及压电陶瓷环 (PZT₁) 固定在一个可精密调节的镜架上 (通过 PZT₁ 上所加电压可改变外腔长度)，镜架中粘接有一块片状的压电陶瓷 (PZT₂)，调节 PZT₂ 上所加电压可使光栅绕一支点作转动，从而可改变光栅的转角。考虑到系统的整体稳定性，将半导体激光器、准直透镜、分束器、光栅及其镜架固定在一块较厚的底板上，并罩在有机玻璃罩内减小空气流动的影响。在光隔离器后用分束器反射出的一小部分光，再分成两束，一

束注入共焦扫描干涉仪以监视激光模式和测量频率调谐范围,另一束入射至波长计以监测输出激光波长。所用的共焦扫描干涉仪腔长约为 102 mm,其自由光谱范围为 735 MHz。

通过调节闪耀光栅角度,使其一级衍射光沿原路反馈回半导体激光器中。调节激光器的温度和注入电流,二者仔细配合,再通过调节 PZT₂ 上所加电压以微调光栅的转角,将输出激光波长调到了 852.11 nm。这一点也由用红外观测仪观察到的从置入光路中的铯饱和蒸汽泡中所发出的明亮的荧光(铯原子 D₂ 线自发辐射荧光)得到了证实。

进而,通过扫描加在 PZT₁ 上的电压以扫描光栅外腔的腔长,实现了激光频率在波长 852.11 nm 处的连续调谐。移走波长计,采用如图 2(a)所示的装置测量铯原子 D₂ 线的饱和吸收光谱。图 2(b)为所得到的典型的含多普勒大背景的铯原子饱和吸收光谱。

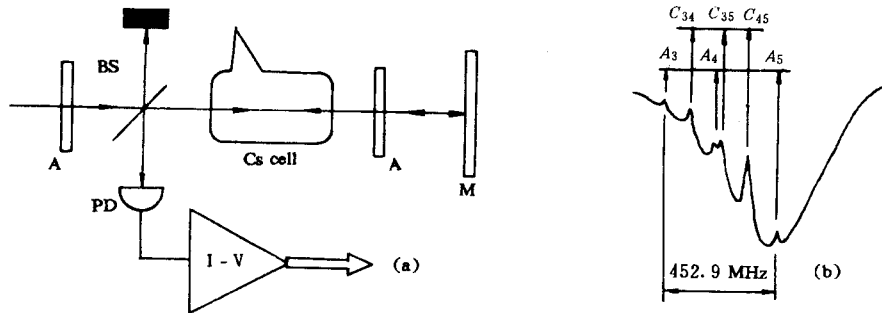


Fig. 2 (a) Sketch of the saturated-absorption spectroscopy of cesium atoms. A: neutral attenuators; BS: beam splitter; Cs cell: saturated vapour cell of cesium atoms; M: high-reflectivity mirror; PD: photo-diode detector; I-V: I-V converter. (b) The saturated-absorption spectroscopy of cesium atoms with a Doppler background (D_2 line of cesium atoms; $6^2S_{1/2}F = 4 - 6^2P_{3/2}F' = 3, 4, 5$ transition)

图 2(b)中多普勒大背景上所迭加的信号对应于铯原子 D₂ 线中的 $6^2S_{1/2}F = 4 - 6^2P_{3/2}F' = 3, 4, 5$ 跃迁。信号 A₃、A₄、A₅ 分别对应 $F = 4$ 到 $F' = 3, F' = 4, F' = 5$ 的三条超精细跃迁线,信号 C₃₄、C₃₅、C₄₅ 则分别对应 $F = 4$ 到 $F' = 3$ 和 4 的交叉线、 $F = 4$ 到 $F' = 3$ 和 5 的交叉线、 $F = 4$ 到 $F' = 4$ 和 5 的交叉线。A₃ 与 A₅ 之间的频率间隔为 452.9 MHz^[12], 由此可推断整个多普勒大背景的频率跨度约为 900 MHz 左右,即激光频率被连续调谐了 900 MHz 以上。

本工作还通过共焦扫描干涉仪大致测量了激光器可连续调谐的频率范围。升高共焦扫描干涉仪的压电陶瓷上的锯齿波电压,使共焦扫描干涉仪在一个锯齿波周期内扫出三个透射峰,则相邻两峰的时间间隔对应着共焦扫描干涉仪的自由光谱范围(约 735 MHz)。适当增加 PZT₁ 上的扫描电压,使激光频率能在 852.11 nm 处更大的频率范围内调谐,从示波器上观测到透射峰仍能连续平滑地移动两个共焦扫描干涉仪自由光谱区,无跳跃现象。于是可再适当加大 PZT₁ 的扫描电压,进一步测量最大的频率连续调谐范围。PZT₁ 上扫描电压过大时,会观测到透射峰的跳跃,即激光器频率已再不能被连续调谐,而发生了跳模。实验中测到的在 852.11 nm 处最大的频率连续调谐范围约三个共焦扫描干涉仪自由光谱区,即约 2.2 GHz。由闪耀光栅外腔腔长 $L = 50$ mm,可推算得外腔纵模间隔约为 3 GHz,所得到的激光频率最大的连续调谐范围(2.2 GHz)小于外腔纵模间隔(3 GHz)。

结 论 采用一种简单的闪耀光栅 Littrow 外部弱反馈构型,迫使商售的 GaAlAs 单模半导体激光器稳定工作在 852.11 nm,得到约 2.2 GHz 的频率连续调谐范围,和半导体激光器自由

运转时 90% 以上的输出功率, 既解决了一般的光栅外部反馈结构中通过光栅实现频率调谐时输出光束方向会发生变化的问题, 又提高了激光器的输出功率利用率。

参 考 文 献

- [1] Ludeke R, Harris E P. Tunable GaAs laser in an external dispersive cavity. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**(3): 439~450
- [2] Harvey K C, Myatt C J. External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12): 910~912
- [3] Caneo C J, Maki J J, McIntyre D D. Optically stabilized diode laser using high-contrast saturated absorption. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(20): 2625~2627
- [4] Dahmani B, Hollberg L, Drullinger R. Frequency stabilization of semiconductor laser by resonant optical feedback. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 876~878
- [5] Wieman C E, Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(1): 1~20
- [6] Gan Jianhua, Li Yimin, Chen Xuzong *et al.*. Magneto-optical trap of cesium atoms. *Chinese Phys. Lett.*, 1996, **13**(11): 821~824
- [7] Zhang T C, Poizat J P, Grelu P *et al.*. Quantum noise of free-running and externally-stabilized laser diodes. *Quantum and Semiclassical Optics*, 1995, **7**(4): 601~613
- [8] Kitching J, Yariv A, Shevy Y. Room temperature generation of amplitude squeezed light from a semiconductor laser with weak optical feedback. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(17): 3372~3375
- [9] Zhang Tiancai, Hou Zhanjia, Wang Junmin *et al.*. Generation of intensity squeezing in laser diodes by weak external cavity feedback. *Chinese Phys. Lett.*, 1996, **13**(10): 734~736
- [10] 张天才, 王军民, 侯占佳等. 外腔半导体激光器中反馈耦合系数及介质吸收系数的测量. *量子光学学报*, 1997, **3**(4): 242~246
- [11] Agrawal G P. Line narrowing in a single-mode injection laser due to external optical feedback. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(3): 468~475
- [12] Schmidt O, Knaak K M, Wynards R *et al.*. Cesium saturation spectroscopy revisited: how to reserve peaks and observe narrow resonances. *Appl. Phys. B*, 1994, **59**(2): 167~178

Frequency Tuning Characteristics of Single-Mode GaAlAs Semiconductor Laser with Weak Feedback from a Blazing Grating

Wang Junmin Yang Weidong Xie Changde Peng Kunchi

(*Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006*)

(Received 15 June 1998; revised 18 September 1998)

Abstract A new-type weak feedback from a blazing grating in Littrow configuration was used to force a single-mode GaAlAs semiconductor laser to run at 852.11 nm. The frequency tuning range of 2.2 GHz around 852.11 nm and the output power higher than 90% of total power in the case of free running were obtained.

Key words single-mode GaAlAs semiconductor laser, blazing grating, weak external feedback, frequency tuning.