

文章编号: 0258-7025(2004)08-0911-04

# 用于干涉测量的光栅外腔半导体激光器

赵伟瑞<sup>1</sup>, 谢福增<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京理工大学光电工程系, 北京 100081; <sup>2</sup> 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要** 研制了用于光干涉测量的单稳频、窄线宽光栅外腔半导体激光器(LD)。它由出光面镀有增透膜的单管半导体激光器、光束校正准直系统、闪耀光栅、注入电流驱动系统及温度控制系统组成。闪耀光栅作为外腔光反馈元件对单管半导体激光器输出的纵模进行选择,使之工作在单纵模状态。外腔的引入还使输出光的谱线宽度得以大大压窄。注入电流驱动系统为半导体激光器提供工作电流。温度控制系统由双层温控组成。第一层用于控制单管半导体激光器管芯温度;另一层用于及时带走第一层温控产生的热量,并消除环境温度影响,使外腔温度稳定。该温控系统可使所构成激光器的温度稳定在 1‰℃量级。对研制的外腔半导体激光器的特性进行测试,其输出功率恒定、模式单一稳定、谱线宽度优于 1.4 MHz。

**关键词** 激光技术;外腔半导体激光器;外腔光反馈;闪耀光栅;单纵模;谱线宽

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Grating External Cavity Semiconductor Laser Used in Interference Measurement

ZHAO Wei-rui<sup>1</sup>, XIE Fu-zeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100081, China*  
<sup>2</sup> *Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract** A single stable frequency and narrow line width external cavity semiconductor laser used in interference measurement is proposed. It is constructed with a semiconductor laser, collimation system, a blaze grating, and current and temperature control systems. The one facet of the semiconductor laser is covered by high transmission film, and the other is covered by high reflection film. The blaze grating is used as external cavity light feedback element to select the mode of the semiconductor laser. The current control system is used to provide drive current to the semiconductor laser, and the drive current is allowed to be adjusted in certain range. The temperature is controlled with double temperature controls to make the temperature of the external cavity stabilized in order of  $10^{-3}$  °C. Thus a single longitudinal mode, narrow spectral line width and stable frequency external cavity semiconductor laser is realized, and its spectral line width is compressed to be less than 1.4 MHz and the output stability (including power and mode) is remarkably improved.

**Key words** laser technology; external cavity semiconductor laser; external cavity light feedback; blaze grating; single longitudinal mode; spectral line width

## 1 引言

干涉测量用激光器应工作于稳定的单纵模和恒定的功率输出状态,否则将会影响测量结果,甚至使测量无法进行。另外,激光器的相干特性直接影响

干涉程长。目前,大多数干涉仪使用的光源为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器或 488 nm (倍频 244 nm) 的氩离子激光器<sup>[1,2]</sup>,但这类激光器的体积大、输入电压高,影响了干涉测量系统的集成化和实用化。由于半导体激光器(LD)具有体积小、重量轻、

收稿日期:2003-08-18;收到修改稿日期:2004-01-17

作者简介:赵伟瑞(1965—),女,北京人,北京理工大学光电工程系副教授,博士,研究方向为光学干涉测试与计量。  
E-mail:zwrjule@yahoo.com.cn

输入电压低、输出功率高、谱线范围宽、易调制、寿命长<sup>[3]</sup>等优点,被广泛应用于加工、医疗及光通信等领域。但 LD 的光斑的发散角大且不对称,其纵模分布十分丰富、相干特性差,这就限制了它在光干涉测量领域中的应用。为此,人们做了大量研究<sup>[4~11]</sup>,对 LD 的光斑进行校正准直,对其谱线宽度进行压窄。

为满足光学干涉测量的要求,在此研制了可用于长光程差干涉测量的单稳频、窄线宽光栅外腔半导体激光器,并对其特性进行了测试与比较。

## 2 原 理

图 1 为根据 Littrow 自准直原理构造的光栅外腔半导体激光器的原理示意图。

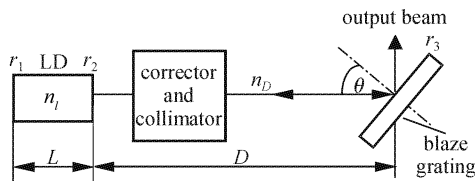


图 1 光栅外腔半导体激光器的原理示意图  
Fig. 1 Principle chart of the grating external cavity semiconductor laser

LD 的一端镀有高反膜另一端镀有增透膜,闪耀光栅为外腔光反馈元件。由 LD 发出的光经光束校正准直器后到达闪耀光栅发生衍射,再将一级衍射光通过光束校正准直器回馈到 LD 中,零级光作为输出光。在这种情况下,对于光栅而言, $\theta$  既是光束的入射角又是一级光的衍射角,零级光和一级衍射光与光栅法线的夹角相等。在强反馈状态下,图 1 所示结构存在着一组满足(1)式所示谐振条件的外腔模

$$2(n_l l + n_D D) = q\lambda \quad (1)$$

其中, $n_l$  和  $n_D$  分别为 LD 腔及外腔介质的折射率, $l$  和  $D$  分别为 LD 腔及外腔的长度, $q$  为一整数。

但外腔半导体激光器最终输出的模式不能由(1)式唯一确定,还与作为外腔反馈元件的闪耀光栅有关。光栅方程为

$$2d \sin\theta = m\lambda \quad (2)$$

其中, $d$  为光栅常数, $\theta$  为衍射角, $m$  为衍射级次。

由此看出,由于光栅有很强的色散性,回馈的光束不再是平行光,而是按光谱散开成一定角度,而有源区的厚度一般为  $0.2 \mu\text{m}$ ,宽度为  $2\sim 5 \mu\text{m}$ ,因此

反馈光不能全部反馈回 LD 的有源区。通过转动光栅,可改变回馈到有源区的光谱成分。当回馈光中的某一波长与 LD 的某一本征模波长一致时,造成该本征模与其余本征模之间很强的损耗差,致使外腔半导体激光器稳定地工作在这一本征模状态。因此,利用光栅可对 LD 的纵模进行选择 and 调制。

外腔半导体激光器的谱线宽度可由(3)式得出<sup>[12]</sup>

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{\{1 + (\tau/\tau_m)[1 - (r_2/r_3)]\}^2} \quad (3)$$

其中, $\Delta\nu_0$  为单管 LD 的谱线宽, $\tau$  和  $\tau_m$  分别为光子在外腔及有源区内的往返渡越时间, $r_2$  为 LD 本征腔出光面的振幅反射系数, $r_3$  为包括外腔中光学元件损耗在内的总有效外腔振幅反射系数。

由此看出, $r_2/r_3$  越小, $\tau/\tau_m$  越大,线宽压窄率越高。因此,可通过对 LD 耦合面镀增透膜来减小  $r_2^2$ ,增大外腔有效反射率以提高  $r_3^2$ ,加长外腔长度以加大  $\tau/\tau_m$  这三种方法来压窄线宽,提高外腔半导体激光器的相干特性。

## 3 系 统 描 述

图 2 为研制的光栅外腔半导体激光器的结构框图。由 LD 出射的光经校正准直器后到达闪耀光栅,发生衍射,调节光栅使一级衍射光回馈到 LD 中,进行模式选择,零级光作为输出光。

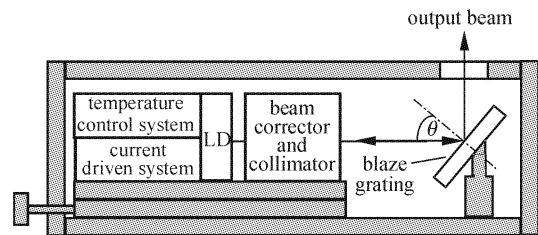


图 2 光栅外腔半导体激光器结构框图  
Fig. 2 Scheme of the grating external cavity semiconductor laser

图 2 所示结构的外腔长约  $6 \text{ cm}$ 。LD 的中心波长为  $942.4 \text{ nm}$ ,谱线分布范围为  $3.6 \text{ nm}$ ,阈值电流为  $53 \text{ mA}$ 。LD 的透过率为  $99.9\%$ 。光束校正准直器由弯月透镜和双胶合透镜组成,属大恒光电研究所的常规产品,其作用是对 LD 的出射光斑进行校正和准直,使光斑的发散角控制在  $0.5 \text{ mrad}$ 。选用闪耀光栅作为外腔光反馈元件,其闪耀波长为  $500 \text{ nm}$ ,光栅常数为  $1/600 \text{ mm}$ ,对于  $942.4 \text{ nm}$  而言,其

一级衍射效率为 17.2%。另外, LD 的管芯温度的变化将使其输出波长产生很大漂移(约 10 GHz/°C), 功率也会剧烈起伏; 而温度变化又将引起外腔光学程长的改变, 导致激光器工作模式不稳, 所以必须对温度进行高精度控制。在此, 对激光器及外腔设置了很好的散热装置, 并设计了温度控制系统对 LD 的管芯温度进行调节, 使工作温度稳定在  $10^{-3}$  °C 的量级, 有效地避免了工作模式的跳变, 大大地减小了输出光波频率的波动。图中的注入电流驱动系统可使激光器工作在恒流或调制状态。

结构中, 外腔的长度和光栅的偏转均有一定的调节范围, 可方便地改变输出光的谱线宽度及波长。

## 4 特性测试

对图 2 所示的光栅外腔半导体激光器的特性进行测试, 并与单管 LD 的特性进行比较。

### 4.1 注入电流与输出功率特性曲线的测试与比较

分别对单管 LD 和光栅外腔半导体激光器的  $P-I$  特性曲线进行测试, 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 外腔的设置使 LD 的阈值电流由原来的 53 mA 降低到 14.6 mA。

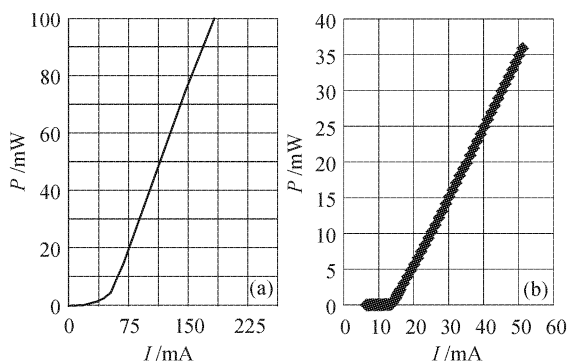


图 3 设置外腔前后的  $P-I$  特性曲线的比较

(a) 单管 LD 的  $P-I$  特性曲线; (b) 加外腔后的  $P-I$  特性曲线

Fig. 3 Comparison of the  $P-I$  curves between the single LD and the LD with external cavity

(a)  $P-I$  curve of the single LD;

(b)  $P-I$  curve of the LD with external cavity

### 4.2 模式分布的测试与比较

当激光器的腔长为 6 cm 时, 其纵模间隔应为:

$$\Delta\nu_q = \frac{c}{2(n_l l + n_D D)} = \frac{3 \times 10^{10}}{2 \times 6} = 2.5 \text{ GHz}.$$

因此用自由光谱范围为 7.5 GHz 的共焦扫描 F-P 干涉仪分别对单管 LD 及加外腔后的 LD 的纵模分布进行测试, 结果如图 4 所示。图中上方的锯齿波为扫描

电压, 电压值为纵坐标示值乘以 100, 所加电压的幅值足以扫描一个自由光谱范围。锯齿波下方为扫描干涉仪出瞳处的探测器的输出。横轴表示时间, 纵轴为探测器的输出。由图 4 可以看出, 未加外腔时, 激光器的模式分布非常丰富, 加光栅外腔后, 激光器工作在很好的单纵模状态。这充分肯定了光栅外腔的良好选模功能。

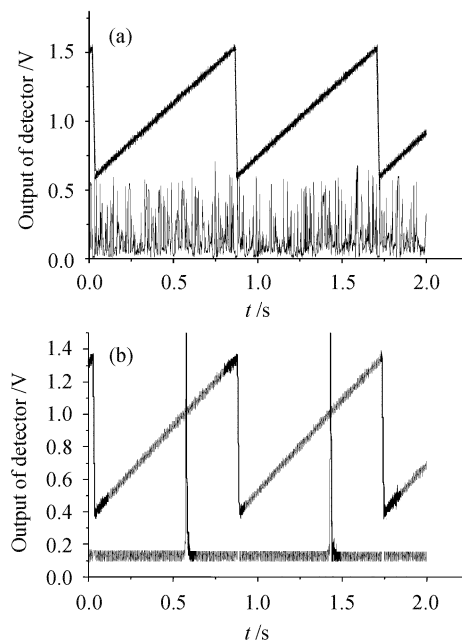


图 4 设置外腔前后的 LD 的纵模分布比较

(a) 单管 LD 的纵模分布; (b) 加外腔后 LD 的纵模分布

Fig. 4 Comparison of the longitudinal mode distribution between the LD and LD with external cavity

(a) longitudinal mode distribution of the single LD;

(b) longitudinal mode distribution of the LD with external cavity

### 4.3 谱线宽度的测量

用自由光谱范围为 300 MHz 的共焦扫描 F-P 干涉仪对光栅外腔半导体激光器的谱线宽度进行测量, 测量结果如图 5 所示。从图中可读出, 谱线宽度为 1.2 MHz, 而所用扫描干涉仪的分辨率为 1.4 MHz, 因此只能定性地认为图 5 所示的光栅外腔半导体激光器的谱线宽度优于 1.4 MHz。根据相干程长公式

$$L = c/\Delta\nu \quad (4)$$

其中,  $L$  为两相干光束间的光程差,  $c$  为光速,  $\Delta\nu$  为谱线宽度, 有  $L = \frac{3 \times 10^8}{1.4 \times 10^6} = 214 \text{ m}$ 。因此当将图 2 所示光栅外腔半导体激光器用作干涉测量系统的光源时, 系统可测量的距离不小于  $L/2 = 107 \text{ m}$ 。

最后, 对光栅外腔半导体激光器出射光束的发散角进行测量, 其发散角为 0.5 mrad。

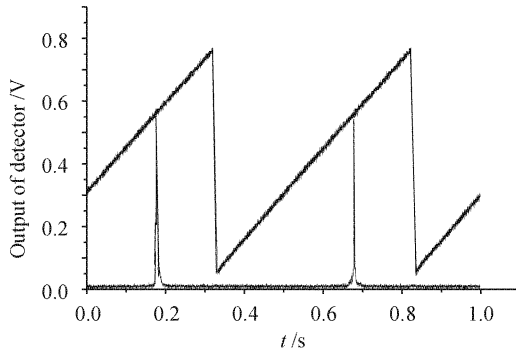


图5 外腔半导体激光器谱线宽度的测量

Fig.5 Spectral line width of the external cavity semiconductor laser

## 5 结 论

通过光栅外腔选模,并配以良好的温度控制和散热结构,再加上稳定的机械结构设计,成功地研制了单稳频、窄线宽的光栅外腔半导体激光器。其谱线宽度优于1.4 MHz,即空间相干长度达214 m以上。由于半导体激光器的光谱范围很宽,且易于通过电流对输出波长进行调谐,因此高品质的光栅外腔半导体激光器可广泛用于高精度光学测量系统中,完成大光程差、高精度的干涉测量。

## 参 考 文 献

- 1 Kou Ge. Study of photoelasticity of optical material by using laser heterodyne interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):68~70  
寇 戈. 采用激光外差干涉仪测量光学材料光弹特性的研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):68~70

- 2 Lin Dejiao, Liu Zhongyao, Zhang Rui *et al.*. System to measure step height by combining dual-frequency interferometry and confocal microscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):1015~1018  
林德教,柳忠尧,张 蕊等. 双频干涉共焦台阶高度测量系统 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):1015~1018
- 3 M. Notomi, O. Mitomi, Y. Yoshikuni. Broad-band tunable two-section laser diode with external grating feedback [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**:85~87
- 4 R. Wyatt. Spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers with strong, frequency-selective feedback [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(15):658~659
- 5 N. A. Olsson, C. H. Henry, R. F. Kazarinov *et al.*. Performance characteristics of a 1.5  $\mu\text{m}$  single frequency semiconductor laser with an external waveguide Bragg reflector [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(2):143~147
- 6 K. C. Harvey, C. J. Myatt. External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12):910~912
- 7 M. G. Boshier, D. Berkeland, E. A. Hinds *et al.*. External-cavity frequency-stabilization of visible and infrared semiconductor lasers for high resolution spectroscopy [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **85**:355~359
- 8 M. de Labacherie, G. Passadat. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3):269~274
- 9 Ma Hai-xia, Lou Qi-hong, Dong Jing-xing *et al.*. A novel resonator to improve the laser beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):977~980  
马海霞,楼祺洪,董景星等. 一种改善激光器输出光束质量的新型谐振腔 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):977~980
- 10 Li Yi-gang, Hou Guo-fu, Lü Ke-cheng *et al.*. Tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-cladding fiber laser with a double-grating configuration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):969~972  
李乙钢,侯国付,吕可诚等. 双光栅外腔可调谐掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):969~972
- 11 Peng Can, Yao Min-yu, Zhang Hong-ming *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):101~104  
彭 璨,姚敏玉,张洪明等. 10 GHz 主动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):101~104
- 12 D. R. Hjelme, A. R. Mickelson. On the theory of external cavity operated single-mode semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(6):1000~1004