

文章编号: 0258-7025(2001)03-0201-04

# 可用于差拍法-珀干涉仪的 633 nm 可调谐 外腔半导体激光器\*

晁志霞 吴健 殷纯永 徐毅  
(清华大学精密系 北京 100084) (中国计量科学研究院 北京 100013)

**提要** 为更好地改善差拍法-珀干涉仪用于对纳米干涉仪进行非线性比对和校准场合的性能,提出用 633 nm 外腔半导体激光器代替 He-Ne 激光器,并针对差拍法-珀干涉仪对工作激光器的要求,设计和实现了 633 nm 可调谐外腔半导体激光器。用前端镀增透膜的 637 nm 量子阱结构半导体激光器件及工作于 Littrow 自准直状态的光栅作为反馈元件,构成外腔激光器。实验结果表明,该激光器具有比较窄的光谱线宽,通过控温和旋转光栅,获得了覆盖 633 nm 的 4 nm 的调谐范围,通过控制频率调谐器,得到了 1.8 GHz 的连续调谐范围。

**关键词** 差拍法-珀干涉仪, 633 nm 外腔半导体激光器, 可调谐, Littrow 自准直

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

## 633 nm Tunable External-cavity Diode Laser Used for Beatwave Fabry-Perot Interferometer

CHAO Zhi-xia WU Jian YIN Chun-yong  
(Tsinghua University, Beijing 100084)

XU Yi  
(National Institute of Metrology, Beijing 100013)

**Abstract** To improve the ability of calibrating the nonlinearity error of nanometer interferometer by beatwave F-P interferometer, a method of using 633 nm external-cavity diode laser (ECL) as the slave laser is presented in this paper. Based on an AR-coated 637 nm quantum well laser diode, using a diffraction grating in Littrow mount for wavelength selection and output coupling, a tunable 633 nm ECL is developed. The experiment results show that the linewidth is narrower than 5 MHz. A course tuning range of 4 nm around 633 nm is achieved through temperature control and grating rotation. By controlling the frequency-tuning device, a continuous tuning range of 1.8 GHz, which is equivalent to a measurement range of  $0.75\lambda$  of beatwave F-P interferometer, is realized.

**Key words** beatwave F-P interferometer, 633 nm external-cavity diode laser (ECL), tunable, Littrow mount

### 1 引言

随着微电子学、材料学、精密机械学、生命与生物学等学科的发展深入到原子领域,迫切需要具有纳米甚至亚纳米精度的测量系统。国家计量科学研究院研制的用于纳米测量的差拍法-珀干涉仪<sup>[1,2]</sup>,将工作激光器的频率锁定于法-珀腔的透射峰,并跟踪法-珀腔的腔长变化,通过测量工作激光器与标准

激光器的拍频,实现了约  $\lambda/4$  范围内分辨率为 0.3 nm 的高精度纳米测量。文献<sup>[3]</sup>采用换模锁定法,将工作激光器的频率依次锁定于法-珀腔的各个干涉级次,使该干涉仪的测量范围从  $\lambda/4$  扩大为  $1.1 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。换模锁定法拓宽了该系统的测量范围,目前,该干涉仪已被用于校准其他纳米干涉仪的非线性误差<sup>[4,5]</sup>。但是,从测量结果(文献<sup>[3]</sup>中的图 4)可看出,6 次换模锁定的瞬间在曲线上产生了 6 个小突起,这是由于在换模锁定的瞬间必须停止采样,影响了测量的连续性。这对于非线性比对和校准的场合是不利的,有必要寻求更好的扩大测量范围的

\* 国家自然科学基金(编号 59735120)资助项目。

收稿日期:1999-11-17;收到修改稿日期:2000-01-10

方法。文献 3 的分析指出,原系统测量范围受限的根本原因在于工作激光器——He-Ne 激光器的调谐范围太小。而半导体激光器的增益曲线比较平坦,只要改善其线宽特性和连续调谐特性,将是一种用于扩大差拍法-珀干涉仪测量范围的理想激光器。

差拍法-珀干涉仪对工作激光器的要求可归纳为以下三点:1)真空中波长能准确调谐到 632.991 nm 以实现和标准激光器的拍频;2)具有优于兆赫量级的窄线宽,以免带来拍频测量误差;3)只要在雪崩光电二极管和频率计的工作带宽内,频率连续调谐范围越大越好。当连续调谐范围为 1~2 GHz 时,对应测量范围为  $\lambda/2 \sim \lambda$ ,该范围对于校准纳米干涉仪的非线性误差已经足够。

基于此,我们对 633 nm 外腔半导体激光器进行了研究。外腔半导体激光器尽管已经在 1.3  $\mu\text{m}$ ,1.5  $\mu\text{m}$ ,780 nm 和 670 nm 波段取得了相当好的结果<sup>[6-9]</sup>,然而由于器件材料等原因,用于计量的 633 nm 外腔激光器的研究在国内还未见报道。本文利用中国科学院半导体所研制的 637 nm 量子阱结构的半导体激光器件,对其前端镀增透膜,采用工作于 Littrow 自准直状态的光栅作为反馈元件,构成外腔激光器。获得了比较窄的频率线宽,通过控温和旋转光栅,实现了覆盖 633 nm 的 4 nm 的调谐范围,通过控制频率调谐器,得到了 1.8 GHz 的连续调谐范围。该激光器已基本满足作为差拍法-珀干涉仪工作激光器的要求。

## 2 结构及调谐原理

差拍法-珀干涉仪要求工作激光器能准确调谐到 632.991 nm,而目前我们能够得到的最接近 633 nm 的半导体激光器管芯输出波长为 637 nm,因此需设计可调谐的外腔半导体激光器。

### 2.1 外腔半导体激光器结构

用光栅作为反馈元件构成外腔激光器,此类外腔结构有两种:Littman 结构<sup>[8,10]</sup>和 Littrow 自准直结构。本文采用了 Littrow 自准直结构,如图 1 所示。

图中由 LD 未镀膜的后端面和光栅构成的外腔腔长约为 4.5 cm。前端镀 633 nm 增透膜,并对 LD 采用了精密控温和控电流措施。LD 发出的光经焦距为 4.5 mm,两面均镀增透膜的透镜准直后入射至光栅,光栅为 1200 线/mm 的闪耀光栅,工作于 Littrow 自准直状态,即 1 级衍射光反馈至 LD 有

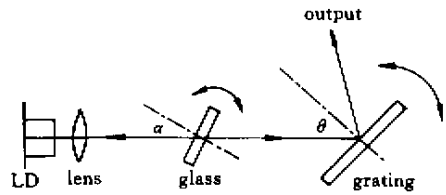


图 1 Littrow 结构的外腔半导体激光器结构示意图  
Fig.1 Optical scheme of external-cavity diode laser in Littrow mount

源区 0 级光作为输出。由于差拍法-珀干涉仪要求工作激光器有独立的频率调谐机构,在腔内还放入了一个 2 mm 厚的两面均镀增透膜的玻璃片作为频率调谐器。

LD 所镀增透膜的残余反射率低于 1%,无光栅反馈时,激光器不激射;有光栅反馈时,形成了激光振荡,产生了激光输出。

### 2.2 调谐原理

对于光栅外腔激光器,激光器的输出波长应满足光栅方程(式(1))和激光振荡相位条件。当 LD 前端面未镀增透膜或镀部分增透膜时,应采用三镜腔模型计算激光振荡相位条件<sup>[11]</sup>;当所镀增透膜质量较好,能忽略残余反射率时,LD 可作为增益介质处理,可得到激光振荡相位条件如式(2)所示<sup>[12]</sup>

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (1)$$

$$q\lambda = 2L \quad (2)$$

式中  $d$  为光栅栅距,  $\theta$  为入射角,  $m$  为衍射级次,  $q$  为频率级次,  $L$  为外腔激光器的总腔长。对式(1)(2)求导,可得到波长粗调谐和频率微调的条件(本文中利用光栅的一级衍射光,即  $m = 1$ )

$$\delta\lambda = 2d \cos \theta \delta\theta \quad (3)$$

$$\delta\nu = -\frac{\nu}{L} \delta L \quad (4)$$

为便于机械结构和自动控制的实现,分离了波长调谐与频率微调元件,波长调谐通过旋转光栅实现,即利用式(3)。本文中,  $d = \frac{1}{1200}$  mm,  $\theta = 22.3^\circ$ ,若要得到 4 nm 的调谐范围,则光栅角度需变化  $\delta\theta = 2.6$  mrad。

而频率微调的依据为式(4),在腔内插入一玻璃片作为频率调谐器,通过旋转频率调谐器使腔长产生微小变化,如图 2 所示。图中光线  $AB$  以  $\alpha$  角入射,  $\beta$  为折射角,  $O$  为光线入射点,  $C$  为出射点,  $E$  为  $C$  在  $AO$  延长线上的投影,  $l_0$  为频率调谐器厚度。则与入射角  $\alpha$  有关的光程  $D$  可用式(5)表示,式中  $n$  为

频率调谐器的折射率(忽略空气折射率)

$$D = n \cdot L_{OC} + (l_0 - L_{OE}) \quad (5)$$

式中  $n \cdot L_{OC}$  为在频率调谐器中与  $\alpha$  有关的光程 ( $l_0 - L_{OE}$ ) 为空气中与  $\alpha$  有关的光程。利用折射定律  $\sin\alpha = n \cdot \sin\beta$ ,  $D$  可表示为  $\alpha$  的函数, 如式(6)所示

$$D = l_0(1 - \cos\alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}) \quad (6)$$

由式(6)可得到  $D$  随  $\alpha$  的变化率  $k$  为

$$k = l_0 \sin\alpha \left( 1 - \frac{\cos\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}} \right) \quad (7)$$

由式(7)可知,  $k$  是  $\alpha$  的非线性函数, 其关系曲线如图 3 所示(设  $l_0 = 1\text{mm}$ ,  $n = 1.5$ )。因此, 选择较大的入射角, 可得到较高的灵敏度。

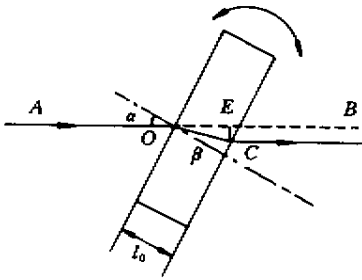


图 2 频率调谐原理图

Fig.2 Schematic diagram of frequency tuning

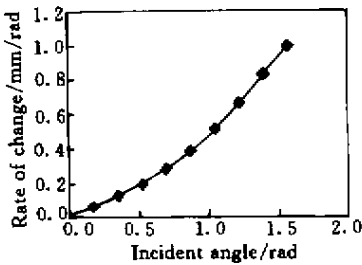


图 3 光程变化率  $k$  随  $\alpha$  的变化曲线

Fig.3 Curve of  $k$  (rate of change) and  $\alpha$  (incident angle)

### 3 实验研究

利用上面描述的激光器结构, 对光栅外腔半导体激光器的线宽特性和调谐特性进行了实验研究。

#### 3.1 光谱线宽

用自由光谱区(FSR)为 18 GHz 的自制扫描干涉仪 I 和 FSR 为 750 MHz 的扫描干涉仪 II 对外腔激光器的输出谱进行了观测, 观测结果分别如图 4(a), (b) 所示。由图可知, 该激光器能够工作于单模窄线宽状态, 图 4(c) 是用扫描干涉仪 II 对频差为 5 MHz 的双频 He-Ne 激光器输出谱的观测结果, 即图(c)

中的谱线包含了频差为 5MHz 的两个频率分量的谱。由于 He-Ne 激光器的谱线很窄, 故图(c)中的谱线宽度为两个频率分量的频差——5 MHz。比较图 4(b), (c), 图(b)中的谱线比图(c)中的谱线锐, 因此, 该外腔激光器的线宽应窄于 5 MHz。

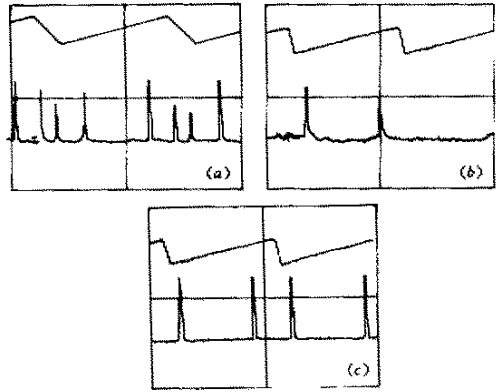


图 4 用扫描干涉仪对外腔半导体激光器和 He-Ne 稳频激光器输出谱进行观测结果的对比(标尺一致的情况下)

(a) 利用扫描干涉仪 I 观测的输出谱 (b) 利用扫描干涉仪 II 观测的输出谱 (c) 双频 He-Ne 激光器输出谱

Fig.4 Comparison of output spectra of ECLD and stabilized He-Ne laser using scanning interferometer (under the same scale)

(a) spectra result using scanning interferometer I ;(b) spectra result using scanning interferometer II ;(c) spectra of dual-frequency He-Ne laser

#### 3.2 调谐特性

为精密检测该外腔激光器的波长调谐特性, 在国家计量科学研究所长度处恒温楼第一综合精密测量实验室内进行了实验, 利用该院研制的红外激光波长计(型号为 HJ-02, 精度为  $10^{-6}$ ), 对该激光器的输出波长和调谐范围进行了测量。在室温  $T = 20^\circ\text{C}$  下, 一共对 6 支管芯进行了实验。实验情况如表 1 所示, 表中中心波长指调谐范围的中心。由表可知, 在室温下, 6 支管芯发射的中心波长均在 637 或 638 nm 附近, 距希望的 632.991 nm 较远。

为得到 632.991 nm 的输出波长, 采用精密控温电路降低管芯的温度, 当温度被控制在  $13^\circ\text{C}$  左右时, 得到了覆盖 633 nm 的波长调谐范围。本文对 4#、6# 管芯进行了实验, 得到的调谐范围均能覆盖 633 nm。在  $T = 12.6^\circ\text{C}$ , 注入电流为 58.73 mA 时, 4# 管芯输出波长调谐到了 632.991 nm; 在  $T = 14.8^\circ\text{C}$ , 注入电流为 61.97 mA 时, 6# 管芯输出波长的

表 1 外腔激光器的波长调谐特性  
Table 1 Wavelength tunability of ECLD

$T = 20^{\circ}\text{C}$			$T = 12 \sim 13^{\circ}\text{C}$		
LD	Center wavelength/nm	Tuning range/nm	LD	Center wavelength/nm	Tuning range/nm
2 <sup>#</sup>	638.8	2.8			
4 <sup>#</sup>	637.4	4.5	4 <sup>#</sup>	634.3	4.3
5 <sup>#</sup>	637.4	2.6			
6 <sup>#</sup>	637.1	3.7	6 <sup>#</sup>	633.9	4.4
7 <sup>#</sup>	638.2	4.1			
8 <sup>#</sup>	638.0	4.3			

调谐到了 632.991 nm。表 1 中也给出了对 4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup> 管芯降温后,外腔激光器的调谐范围和中心波长。

针对差拍法-珀干涉仪对工作激光器频率连续调谐范围的要求,设计了柔性铰链机构,将频率调谐器固定在柔性铰链的运动部分,用压电陶瓷驱动,可使柔性铰链产生约 0.32 mrad 的微小转动。实验采用的频率调谐器厚度为 2 mm,入射角约为 60°,根据式(7), $k = 1 \text{ mm/rad}$ 。因此,0.32 mrad 的转动将引起约 1.7 GHz 的频率变化。经实验验证,用扫描干涉仪 II 进行观测的结果表明,该外腔激光器频率能够连续调谐约 1.8 GHz,与理论值比较符合。1.8 GHz 的频率调谐范围,可使差拍法-珀干涉仪测量范围大于  $0.75\lambda$ 。

## 4 结 论

本文利用中国科学院半导体所研制的 637 nm 量子阱结构的半导体激光器件,对其前端镀增透膜,采用工作于 Littrow 自准直状态的光栅作为反馈元件,构成外腔激光器。实验结果表明,该激光器具有较窄的频率线宽,通过控温和旋转光栅,获得了覆盖 633 nm 的 4 nm 的调谐范围,通过控制频率调谐器,得到了 1.8 GHz 的连续调谐范围。该激光器已基本满足作为差拍法-珀干涉仪工作激光器的要求。

致谢 中国科学院半导体所提供镀膜的管芯并封装成实验可用的器件,特此致谢。

## 参 考 文 献

- Xu Yi, Ye Xiaoyou, Li Chengyang *et al.*. A Fabry-Perot interferometer for measuring micro-displacement. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 1993, **14**(2):94 ~ 98 (in Chinese)
- Xu Yi, Ye Xiaoyou, Li Chengyang *et al.*. A high precise laser heterodyne interferometer for measuring nanometer displacement. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 1990, **11**(1):32 ~ 35 (in Chinese)
- Chao Zhixia, Xu jie, Xu Yi. Fabry-Perot interferometer used for large range nanometer measurement. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 1999, **20**(4):241 ~ 246 (in Chinese)
- Chunyong Yin, Gaoliang Dai, Zhixia Chao *et al.*. Determining the residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(8):1361 ~ 1365
- Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong *et al.*. Determining the residual nonlinear error of a dual-frequency interferometer for nanometrology. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(11):987 ~ 992 (in Chinese)
- Pan Zhongqi, Yang Jinqiang, Dong Qiming *et al.*. An external-cavity semiconductor laser with a wide piezoelectric tuning range. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(6):485 ~ 489 (in Chinese)
- Chai Yanjie, Zhang Hanyi, Xie Shizhong *et al.*. Wide-band tuning property of external cavity semiconductor laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **A20**(10):725 ~ 728 (in Chinese)
- K. C. Harvey, C. J. Myatt. External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12):910 ~ 912
- M. G. Boshier, D. Berkeland, E. A. Hinds *et al.*. External-cavity frequency-stabilization of visible and infrared semiconductor lasers for high resolution spectroscopy. *Opt. Comm.*, 1991, **85**(4):355 ~ 359
- Michael G. Littman. Single-mode operation of grazing-incidence pulsed dye laser. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(4):138 ~ 140
- L. Goldberg, H. F. Taylor, A. Dandridge *et al.*. Spectral characteristics of semiconductor lasers with optical feedback. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(4):555 ~ 564
- M. de Labacherie, G. Passedat. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3):269 ~ 274