

电控宽带连续调谐外腔半导体激光器*

潘仲琦 杨今强 董启明 张汉一 郭奕理 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 介绍了一种电控调谐的外腔半导体激光器,并对其连续调谐特性进行了理论和实验分析。压电陶瓷(PZT)(双晶片)的电扫描角度可达 1° ,采用适当的外腔结构,靠PZT可同时改变外腔腔长和光栅衍射角,实现输出波长的调谐。该器件调谐范围最大可达 15 nm ,连续调谐范围(无跳模)为 50 GHz 。

关键词 外腔半导体激光器,连续调谐,压电陶瓷(PZT)

1 引言

采用光栅作为外反馈元件的外腔半导体激光器,可以得到宽带调谐的单纵模激光输出。该器件具有结构紧凑、效率高、寿命长、线宽窄、波长调谐范围宽、可产生超短光脉冲输出和实现高频幅度和频率调制等优良性能,是新一代的可调谐光源,有可能取代染料、光参量放大器、钛蓝宝石等传统的可调谐激光器。它可用于工业现场工艺监控、大气环境污染监测、水质土壤检测、医学诊断和其它高分辨率光谱分析测量等领域。另外它也是光纤通信、光交换技术、光波器件测量、计量检测、频标、高分辨率光谱分析等领域必须的重要光源。

光栅外腔半导体激光器宽带调谐的常用方法是采用手动或马达控制光栅的转动和外腔腔长。如果要对波长进行快速准确的连续调谐,就需要采用电调谐方式。本文介绍了一种使用压电陶瓷(PZT)进行电控调谐的外腔半导体激光器,并对其连续调谐特性进行了理论和实验分析。该器件调谐范围最大可达 15 nm ,连续调谐范围(无跳模)为 50 GHz 。

2 连续调谐的原理及实现方法

在光栅外腔半导体激光器中,依靠光栅的转动,使能反馈回激光器(LD)有源区的光波长发生改变,从而改变激光器的输出波长,实现波长的调谐。理想情况下,光栅外腔激光器的最大调谐范围接近半导体材料的增益谱宽,对于短波长($0.60\sim 0.99\ \mu\text{m}$)激光器约可调谐 $10\sim 30\text{ nm}$,长波长($1.3\ \mu\text{m}, 1.5\ \mu\text{m}$)激光器可调谐 $60\sim 120\text{ nm}$,而量子阱结构的器件调谐范围更宽,可达到 $100\sim 240\text{ nm}$ 以上。实际应用中单个外腔激光器的调谐范围主要受限于外腔的结构参数(如各界面反射率、光栅耦合效率等)以及注入电流、工作温度等因素。

* 高技术 863 计划和国家自然科学基金资助项目。

要实现光栅外腔半导体激光器的宽带连续调谐,在实验技术上一般应满足以下几个条件:

(1) 激光器管芯所镀增透膜的特性要好。若增透膜特性差,内腔模损耗小,使光栅反馈对振荡模式影响较小,主要由内腔决定振荡模式,导致只能在各内腔模附近很小的范围内进行调谐,甚至输出波长只能在各内腔模间跳变。

(2) 外腔的调谐结构要满足一定的要求,即谐振腔的腔长 L 与光栅衍射角 θ 必须同步变化。F. Favre^[4] 等人从光栅方程和激光振荡相位条件

$$\begin{cases} 2d\sin\theta = m\lambda \\ q\lambda = 2L \end{cases} \quad (1)$$

得到光栅在 Littrow 方式下的连续调谐条件为 $L/\sin\theta = \text{常数}$ 。

(3) 外腔要有很好的选频特性、较高的反馈强度及稳定的调谐结构,一般可以采用压窄光栅反馈的光谱宽度、提高外腔的耦合强度等方法实现。

近年来出现的连续调谐外腔激光器大体上有以下几种结构:(1) 用步进马达驱动,靠高倍率细分步距及精确的机械传动结构使光栅同时转动和平移,实现光栅反馈波长与腔模波长同步移动^[1];(2) 使用三维的压电陶瓷,三路电压控制光栅状态^[2];(3) 上两种结构的组合,马达只控制光栅转动,由 PZT 控制腔长变化,或在外腔中插入一平板透明介质,靠控制平板转动改变腔长;(4) 用一个压电陶瓷转动光栅^[3]。上述方法均采用二维传动的复杂机械结构或在腔内附加转动的 FP 标准具等措施实现连续调谐。为了尽可能地简化结构,提高外腔激光器的实用化性能,我们提出了偏轴调谐的技术思想,推导出在偏心驱动方式下的连续调谐条件,成功地解决了连续调谐的问题。

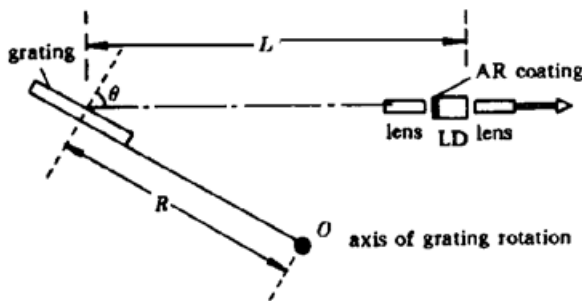


图1 偏轴连续调谐方式

Fig. 1 Continuous tuning by a bias-axis driven method

采用的偏轴驱动方式如图1所示。半导体激光器(LD)的一面镀有增透膜(AR),输出光经透镜准直后入射到衍射光栅上,光栅采用自准直方式。谐振腔腔长为 L ,光栅衍射角为 θ ,光栅转动半径为 R 。与原有的调谐方式不同,在偏轴驱动方式下,光栅转动的中心不是位于光学系统的光轴上,而是位于轴外点 O ,这样在转动光栅的同时,谐振腔的腔长也同时发生了变化。只要选择合适的转动半径 R ,腔长 L 与衍射角 θ ,就可以在一定的范围内满足式(1)所规定的连续调谐条件。可见,这种调谐方式不需要采用复

杂的二维传动结构,大大简化了调谐结构的设计。

在小角度近似下,利用几何学关系,可以得到 L , R 及 θ 应满足以下关系

$$\delta L = \frac{R\delta\theta}{\cos\theta} \quad (2)$$

由(1)式可得(考虑最常用的一级衍射光)

$$\begin{cases} \delta\lambda = \frac{2d\cos\theta}{\delta\theta} \\ \delta\lambda/\lambda = \delta L/L \end{cases} \quad (3)$$

由(2)和(3)式可得到连续调谐条件,即腔长和衍射角应满足

$$L = \frac{R\text{tg}\theta}{\cos\theta} \quad (4)$$

(4) 式即为偏轴调谐方式下的连续调谐条件。我们设计的电控连续调谐外腔半导体激光器, 就采用这种调谐方式, 其谐振腔的结构满足(4)式的要求。

3 压电陶瓷(双晶片)的结构及特性

与集成器件相比, 光栅外腔激光器的不足之处是机械稳定性较差, 特别是波长调谐速率低。迄今为止所报道的使用压电陶瓷调谐的外腔激光器, 一般均利用圆柱形的压电陶瓷管, 调谐方法有以下两种: (1) 微调外腔的腔长, 这时调谐范围一般只是一个纵模间隔, 约为 10 GHz 左右; (2) 微调光栅的角度, 这时调谐范围主要受限于 PZT 的最大伸长量, 压电陶瓷管的形变量一般仅 1 μm 左右, 故调谐范围最大到几十 GHz。因此要得到更大的电调谐范围, 就必须采用新的器件结构和调谐方法。



图2 压电陶瓷双晶片结构示意图
Fig.2 The structure of bimorph

我们设计了新的电调谐外腔激光器, 采用一种新型的压电陶瓷(双晶片)结构, 如图2所示。当给双晶片加电压时, 由于电致伸缩效应, 双晶片的一面伸长, 另一面缩短, 就会发生弯曲, 达到角度扫描的目的, 一般只需加几十伏电压, 它的角度扫描范围就可达到 1°~ 2°, 相应的调谐范围

围可达到 10 nm 以上。

对于片状压电晶体, 其形变量 δl 与其长度 l 的比值为

$$\frac{\delta l}{l} = d_{31}E_3 \tag{5}$$

其中 E_3 为纵向电场, d_{31} 为压电晶体的应变常数。由上式可得到双晶片偏转角度 θ 与外加电压 V 之间的关系为

$$\theta^2 = \frac{2d_{31}V}{h} \tag{6}$$

其中 h 为双晶片厚度。使用的双晶片厚度 $h = 0.3 \text{ mm}$, 长度 $l = 30 \text{ mm}$, 材料(PZT-8)压电系数 $d_{31} = -97 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。若电压 V 从 -100 V 变化到 $+100 \text{ V}$, 对应 θ 变化 0.92° 。使用 1200 L/mm 的光栅, 对于 $1.5 \mu\text{m}$ 激光器波长可调谐 12 nm ; $1.3 \mu\text{m}$ 激光器波长可调谐 17 nm ; $0.8 \mu\text{m}$ 激光器波长可调谐 23 nm 。这么宽的调谐范围是原有的电调谐器件所无法比拟的。

4 新型外腔激光器的结构性能

我们采用偏轴调谐的方式, 利用新型的压电陶瓷, 设计了新的电调谐外腔激光器, 其结构如图3所示。整个器件采用了双层控温结构, 不但对激光器管芯而且对整个腔体都进行恒温控制, 以保证器件输出功率及单模工作的稳定性。用双晶片驱动光栅转动, 光栅转动的轴心位于系统光轴外, 器件结构的设计保证了外腔腔长和光栅衍射角同步变化, 满足式(4)给出的连续调谐条件。

实验所用激光器管芯为中国科学院半导体所

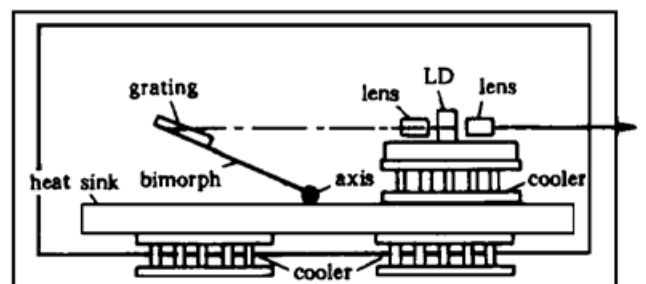


图3 电调谐外腔激光器的结构

Fig.3 The structure of PZT tuning ECLD

研制的 $1.3 \mu\text{m}$ 波长 F-P 结构激光器, 镀增透膜后其荧光谱中心波长为 $1.315 \mu\text{m}$ 。激光器在无外反馈和有外反馈时的 $P-I$ 特性曲线如图 4 所示。可以看出在 LD 镀增透膜后, 无外部反馈时, 无法形成激光振荡, 管芯不激射; 当加入外反馈后, 形成了谐振腔, 产生激光输出。我们使用的管芯在外腔工作条件下的阈值电流为 40 mA , 其中管芯和热沉的温度分别控制在 14.9°C 和 16.24°C 。

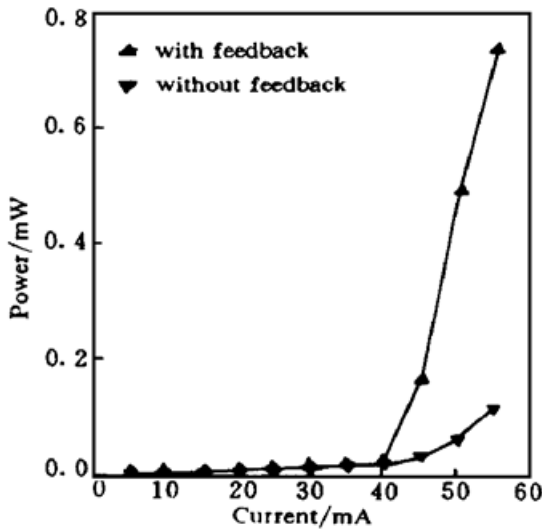


图 4 有无外反馈时的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 4 $P-I$ characteristics with (▲) and without (▼) a feedback

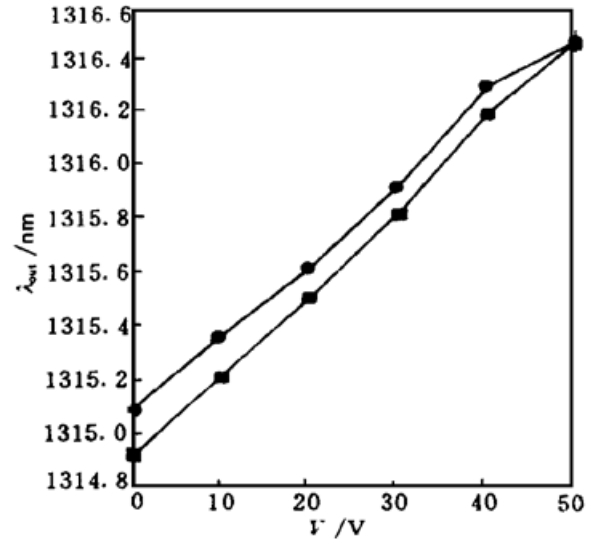


图 5 电调谐特性曲线

□: 电压上升; ●: 电压下降

Fig. 5 The electrical tuning characteristics

□: voltage goes up; ●: voltage goes down

对新型激光器的调谐特性进行了实验。激光器工作电流为 50 mA , 管芯和热沉的温度分别控制在 14.9°C 和 16.24°C , 改变 PZT 上所加的电压, 由于光栅反馈角度和腔长的变化, 使输出波长发生变化, 实验结果如图 5 所示。在外加电压升高和降低时, 由于压电陶瓷固有的形变滞后现象, 在同一电压下输出波长略有差异, 大约在 0.1 nm 左右。这种滞后效应可以通过选择 PZT 材料、改变器件结构及负载大小、采用合理的驱动方式等措施得到一定程度的改善。

使用电调谐的方式, 不仅可以大大提高波长调谐的速度和精确性, 最突出的优点是其输出波长与 PZT 上外加电压有一定的对应关系, 有利于实现波长的实时显示。由于 PZT 材料存在形变滞后现象, 波长的标定和显示存在一定误差, 从实验结果可以看出, 这种误差可以控制在 0.1 nm 的范围内。

因为 PZT 晶体能够扫描的角度有限, 该器件的调谐范围还远小于半导体增益介质的增益谱宽度, 有待于进一步研究新的扫描结构及调谐方式, 增大其调谐范围, 使电调谐外腔激光器能够在更多的领域得到应用。

该器件已提供有关单位在光谱分析领域得到应用, 使用结果良好。

参 考 文 献

- 1 Emmerich Muller, Wolfgang Reichert, Clemens Ruck *et al.*. External-cavity laser design and wavelength calibration. *Hewlett-packard Journal*, 1993, 44(1): 20~ 27
- 2 Schremer A. T., Tang C. L.. External-cavity semiconductor laser with 1000 GHz continuous piezoelec-

tric tuning range. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1990, **2**(1) : 3~ 5

- 3 J. Mellis, S. A. Al-Chalabi, K. H. Cameron *et al.*. Miniature packaged external-cavity semiconductor laser with 50 GHz continuous electrical tuning range. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(16) : 988~ 989
- 4 F. Favre, D. Le Guen, J. C. Simon *et al.*. External-cavity semiconductor laser with 15 nm continuous tuning range. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(15) : 795~ 796

An External-cavity Semiconductor Laser with a Wide Piezoelectric Tuning Range

Pan Zhongqi Yang Jinqiang Dong Qiming

Zhang Hanyi Guo Yili Zhou Bingkun

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper, a new electrical tuning method for an external cavity semiconductor laser is presented. The continuous tuning condition is theoretically and experimentally analyzed. A single PZT (Bimorph) is used to change both the cavity length and the grating angle. The cavity structure is so designed that the continuous tuning condition can be satisfied. The scanning angle of the bimorph is about 1° . As wide as 15 nm a tuning range and a 50GHz continuous range (without mode hopping) are obtained.

Key words external-cavity semiconductor laser, continuous tuning, piezoelectric (PZT)