

DOI: 10.7652/xjtuxb201510005

采用同步调谐方法的 Littman 型 可调谐半导体激光器

张为波, 刘志刚, 周扬理, 龚海

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对采用无镀膜激光二极管的外腔可调谐半导体激光器的跳模现象难以控制的问题, 研制了一种采用无镀膜的激光二极管的 Littman 型外腔可调谐半导体激光器。该激光器通过星型柔性铰链调节反射棱镜的角度, 采用带有柔性结构的光栅座调整光栅位置与角度, 用粗调与细调旋钮改变激光二极管后端面的位置, 利用同步调节激光二极管的注入电流与压电陶瓷驱动电压的方法, 通过实验估计确定了激光二极管注入电流与压电陶瓷扫描电压同步调谐比例系数, 实现了激光器内外腔纵模同步跟踪, 有效避免了跳模的产生。实验结果表明, 所研制的 Littman 型外腔可调谐半导体激光器单纯依靠压电陶瓷电压调谐和二极管注入电流调谐仅能实现约 18 GHz 与 60 GHz 的无跳模调谐, 而采用同步调谐的方法实现了 105 GHz 的连续无跳模调谐, 频率调谐的扫描频率为 20 Hz, 满足了激光光频扫描干涉测距的应用要求。

关键词: 激光器; 连续无跳模调谐; 同步调谐; Littman 结构; 无增透膜激光二极管

中图分类号: TB96 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)10-0029-05

Tunable Diode Lasers in Littman Configuration with Synchronous Tuning

ZHANG Weibo, LIU Zhigang, ZHOU Yangli, GONG Hai

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is difficult to control the mode-hop of a diode laser without antireflection as light source in an external cavity diode laser. A star-flexure hinge and a grating mount with a flexure hinge are used to adjust the angle and position of reflector and grating. The position of laser rear facet is changed by coarse and fine adjustments. Mode match of inner cavity and external cavity is realized and mode-hop is avoided by simultaneous tuning injection current of diode lasers and PZT voltage with the proportionality coefficient from experiment estimation. The result indicates that only mode-hop-free tuning of 18 GHz and 60 GHz is achieved by PZT voltage tuning and injection current of diode lasers tuning, while the mode-hop-free tuning range is extended to 105 GHz at a scan rate of 20 Hz by simultaneous tuning of the injection current of diode lasers and PZT voltage, thus the performance satisfies the requirement of frequency sweeping interferometer measurement.

Keywords: lasers; mode-hop-free tuning; simultaneous tuning; Littman configuration; diode lasers without antireflection

可调谐外腔半导体激光器(ECDL)结构紧凑、线宽窄、效率高、可靠性高、成本低,已被广泛应用于

收稿日期: 2015-03-05。 作者简介: 张为波(1990—),男,硕士生;刘志刚(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375376)。

网络出版时间: 2015-08-18 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150818.0927.008.html>

高精度光谱仪^[1]、原子冷却与俘获、光通讯以及干涉测量^[2]等领域。在 Littrow 型可调谐激光器中光栅直接作为选频与光反馈元件,结构简单,出射光为光栅的 0 级衍射光,其出射方向会随光栅转角的变化而改变,而在 Littman 型可调谐激光器中光栅的 1 级衍射光经反射棱镜后反馈回激光二极管,0 级衍射光作为出射光,出射方向不变,因此 Littman 结构激光器更适合应用于激光干涉测量。

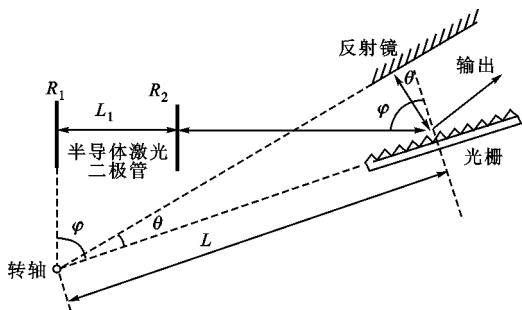
连续无跳模调谐范围是可调谐激光器的一项关键性能指标,如何增大连续无跳模调谐范围一直是研究的热点。文献[3]从理论上计算出同步调谐过程中电流改变量与电压改变量的比值,并用廉价的电子电路同步改变激光二极管电流和外腔腔长,在 Littrow 结构中将无镀膜的 ECDL 的连续调谐范围扩展到了 80 GHz。文献[4]将多个压力陶瓷(PZT)用到 Littrow 结构中,通过控制多个 PZT 不同的伸长量不仅可以改变光栅的角度而且可以改变外腔长度,通过同步调节光栅角度、外腔长度以及激光二极管的注入电流,采用无镀膜的半导体激光二极管实现了 90 GHz 的连续调谐,但是这种方法不仅增加了结构的复杂程度,而且增加了同步控制的难度。文献[5]用锁相放大器将光功率信号与驱动信号比较的误差通过电子回路反馈到控制系统中,从而在用无镀膜激光二极管的 Littman 结构中将连续无跳模调谐范围从 1 GHz 扩大到了 65 GHz,由于采用了锁相放大器与电子回路反馈,在增加激光器成本的同时也增加了控制系统的复杂程度。文献[6]构建了内外腔模式的动力学模型,利用同步改变电流和光栅位置的方法实现了无镀膜半导体激光器连续调谐 73 GHz,但是驱动信号是非线性变化的。文献[7]用偏振光谱反馈闭环控制的方法将无跳模调谐范围扩展到了 130 GHz,但扫描频率仅有 11 Hz。文献[8]设计的短外腔 Littrow 型可调谐激光器对于转轴位置的精度要求并不是很高,利用同步改变内外腔模式的方式实现了 135 GHz 的连续调谐。

本文研制了一种单模、无镀膜的 Littman 型可调谐半导体激光器,采用基于内外腔纵模同步调谐的实验估计法,实现了在驱动频率大于 20 Hz 情况下的大于 105 GHz 的连续无跳模调谐。

1 ECDL 内外腔纵模同步调谐原理

Littman 型可调谐半导体激光器结构如图 1 所示。激光二极管内腔是带有增益的 F-P 谐振腔, R_1 和 R_2 是激光器前后端面的反射系数,激光二极管

后端面与反射镜构成激光器的外腔。等效外腔长度 L_2 可以表示为 $L_2 = L(\sin\varphi + \sin\theta)$ 。



φ 为入射光与光栅法线的夹角; θ 为一级衍射光与光栅法线的夹角; L 为转轴点与衍射点之间的距离; L_1 为等效内腔长度

图1 Littman 型 ECDL 结构示意图

根据光栅方程,光栅所选择的波长为

$$\lambda_g = \frac{d}{m}(\sin\varphi + \sin\theta) \quad (1)$$

式中: d 是光栅常数,即两条光栅刻线之间的距离; m 为衍射级次。

根据驻波条件,外腔对应的波长为

$$\lambda_e = \frac{2L_2}{N_2} = \frac{2L(\sin\varphi + \sin\theta)}{N_2} \quad (2)$$

式中: N_2 为外腔纵模数。外腔对应波长与光栅选择波长差为

$$F_\lambda = \lambda_g - \lambda_e \quad (3)$$

当反射镜绕转轴转动时,光栅衍射角和等效外腔长度 L_2 同时发生变化, λ_g 和 λ_e 随之改变。当 F_λ 小于纵模间距的一半时, N_2 不发生变化,波长变化过程中不会出现跳模;当 F_λ 大于纵模间距的一半时, N_2 发生变化,出现跳模。

对于有增透膜的激光二极管,前端面的透射率很高,前端面与反射镜之间构成的腔体与内腔之间的耦合作用很小,因此对出射光的波长影响也很小。带有增透膜的激光二极管的价格及其昂贵,而对于廉价的无镀膜的激光二极管,前端面的透射率较低,前端面与反射镜之间构成的腔体与内腔之间的耦合作用对出射光的波长影响很大,容易导致跳模现象的发生。

假设内腔的纵模数 N_1 和外腔纵模数 N_2 为常数,输出光的波长 λ 和纵模数之间的关系可以用以下两个公式进行描述

$$L_1 = N_1\lambda/2 \quad (4)$$

$$L_2 = N_2\lambda/2 \quad (5)$$

为了使输出波长改变 $\Delta\lambda$,内腔长度与外腔长度的改变量 ΔL_1 和 ΔL_2 应当同时满足以下两个方程

$$\Delta L_1 = N_1 \Delta \lambda / 2$$

(6)

$$\Delta L_2 = N_2 \Delta \lambda / 2$$

(7)

因此,可以得到

$$\Delta L_1 / L_1 = \Delta L_2 / L_2$$

(8)

按照式(8)中的规律同时改变内、外腔的长度便可以实现 $\Delta \lambda$ 范围的连续无跳模调谐。

在 Littman 结构中,外腔长度变化量 ΔL_2 可以用衍射角 θ 的变化量 $\Delta \theta$ 来表示

$$\Delta L_2 = L \cos \theta \Delta \theta$$

(9)

从式(1)可以得到

$$\Delta \theta = \frac{\Delta \lambda}{d \cos \theta}$$

(10)

联立式(6)、式(7)、式(9)以及式(10),可得

$$\Delta L_2 = \frac{N_2 d \Delta \theta \cos \theta}{2} = \frac{L_2 d \Delta \theta \cos \theta}{\lambda}$$

(11)

假设激光二极管电流变化量 ΔI 和输出波长变化量 $\Delta \lambda$ 之间存在如下关系

$$\Delta \lambda = \gamma \Delta I$$

(12)

式中: γ 为电流变化量对波长的影响系数,同一个激光二极管的 γ 值通常是一个常数。通过式(7)和式(12)可以得到 ΔI 一个新的表达式

$$\Delta I = \frac{2 \Delta L_2}{\gamma N_2}$$

(13)

假设反射镜的转动角度 $\Delta \theta$ 与 PZT 驱动电压 ΔV 之间的关系可以用下面的式子来描述

$$\Delta \theta = -k \frac{\Delta V}{l}$$

(14)

式中: k 是 PZT 伸长量与加载电压之间的比值,通常是一个常数; l 是 PZT 到转轴点之间的距离。

根据式(11)、式(13)和式(14),可得激光二极管电流变化量与 PZT 驱动电压变化量之间需要满足下面的关系

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{k d \cos \theta}{\gamma l}$$

(15)

式中: k 、 d 、 l 以及 γ 都是常数。由于 θ 的变化量很小, $\cos \theta$ 可以认为是一个常数。因此, ΔI 与 ΔV 之间的比值是一个常数,与外腔纵模数 N_2 无关,实现了改变波长过程中内外腔模式的同步跟踪,避免了跳模的发生。

2 ECDL 系统研制与同步调谐扫频实验

2.1 ECDL 的研制

本文所研制的 Littman 型可调谐半导体激光器的结构如图 2、图 3 所示。采用的激光二极管是商用单模无增透膜的半导体激光二极管(Thorlabs

L785 P090),其中心波长为 785 nm,额定电流为 120 mA。激光二极管安装在准直套筒中(Thorlabs LT230P-B),并通过其中的透镜对出射光进行准直。为了稳定激光二极管的温度,将激光二极管及其准直套筒安装于黄铜加工的散热结构中,并通过半导体制冷器(Thorlabs TEC1.4-6)、热敏电阻(Thorlabs TH10K)以及激光器控制器(SRS LDC501)来控制激光二极管的温度,激光器控制器同时可以调节激光二极管的注入电流。采用全息光栅(1800 刻线/mm Edmund 43775)作为激光器的分光与选频元件。可调谐半导体激光器采用直角棱镜作为反射镜,以便于调整反射光线由原光路返回,直角棱镜安装在星型柔性铰链悬臂上^[9-10],压电陶瓷 PZT(Thorlabs AE0505D16F,最大伸长量为 17.4 μm)在驱动电压(PZT 驱动器,型号 Thorlabs MDT693A)作用下推动悬臂,从而带动与悬臂连接的直角棱镜摆动,进而改变光栅衍射角度,达到改变波长的目的。双通道函数发生器(泰克 AFG3052C)生成两路同步扫描信号,同时改变激光二极管电流和 PZT 驱动电压。直角棱镜架采用了柔性铰链与 U 型槽结构,通过调整反射镜架的高度与俯仰角度保证反射光沿原光路回到激光二极管内腔。将激光器及其散热结构连接在一维柔性位移平台上,精密调节激光器与光栅之间的相对位置,微调 ECDL 外腔长度,使激光二极管后反射面、光栅平面、反射棱镜反射面的交点与柔性铰链转轴点重合。此外,两个可调整反射镜可以调节出射光水平出射。

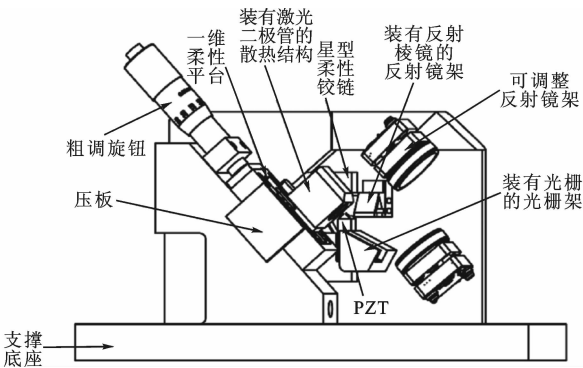
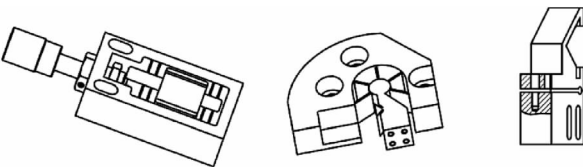


图 2 Littman 型可调谐半导体激光器结构图



(a) 细调部件 (b) 星型柔性铰链 (c) 反射镜架

图 3 Littman 结构中 3 个重要的零部件

本文中所测到的信号是由光电探测器将光信号转化得到的电信号,其幅值为相对大小,因此文中信号幅值的单位为 1。本文采用自由光谱范围为 1.5 GHz 的法布里-帕罗(F-P)标准具(Thorlabs SA200)和迈克尔逊干涉仪对所研制的 ECDL 的性能进行评估,如图 4 所示。采用灵敏度高、响应速度快的光电探测器(Thorlabs DET10ADET)探测光学干涉信号,并通过数据采集卡(NI-PXI 6133PXI)进行采集。将温度设置在 25℃,电流设置在 120 mA,当温度稳定后,打开控制器的电流输出,半导体激光二极管发射激光。当外腔反馈起作用时,输出光的功率会发生变化,因此可以根据激光器输出光的功率变化来判断 ECDL 外腔是否发生谐振。如图 5 所示,函数发生器生成的三角波信号使 PZT 驱动器输出

0~150 V 的三角波驱动 PZT,使直角棱镜按三角波规律周期扫描,改变与光栅的夹角。ECDL 外腔若没有发生谐振,光电探测器检测到的功率信号比较稳定,仅有很微小的波动,如图 5a 所示;若外腔发生谐振,功率信号出现较大波动,如图 5b 所示。

2.2 同步调谐实验结果

实现连续调谐主要原理是保持反馈元件所选择的波长与外腔所对应的波长一致,从而防止出现由于两者不同而造成的模式竞争^[11],实现单模的调谐。在结构上,ECDL 如果满足反射镜平面、光栅平面与激光二极管后端面均通过反射镜回转轴心这一要求,就可以获得不受限制的连续无跳模调谐范围。然而,这对 3 个元件的位置精度提出了极高的要求,否则激光器将失谐,直接输出无外腔反馈的放大自发辐射。图 6a 是由自由光谱范围为 1.5 GHz 的 F-P 标准具测得的 ECDL 扫频光谱,仅调节 PZT 的电压,改变反射棱镜与光栅夹角,得到了约 18 GHz 的连续无跳模调谐范围。图 6b 显示改变电流 40~140 mA,调节波长,使内腔连续无跳模调谐范围达到了 60 GHz。

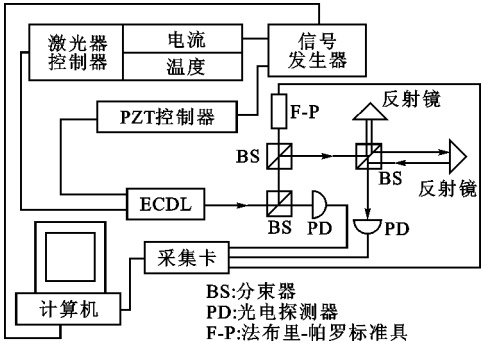


图 4 Littman 型 ECDL 同步调谐原理图

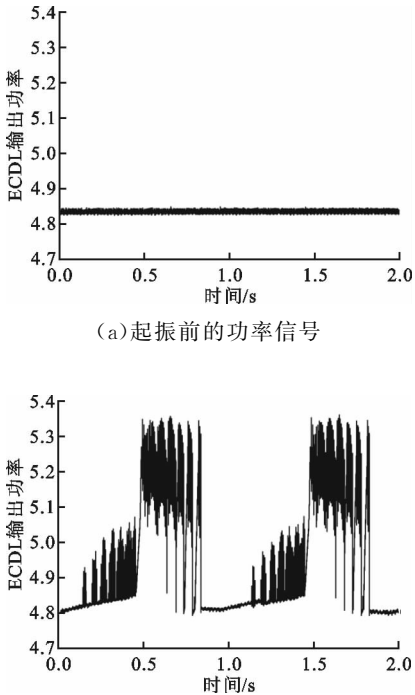


图 5 起振前后的功率信号变化

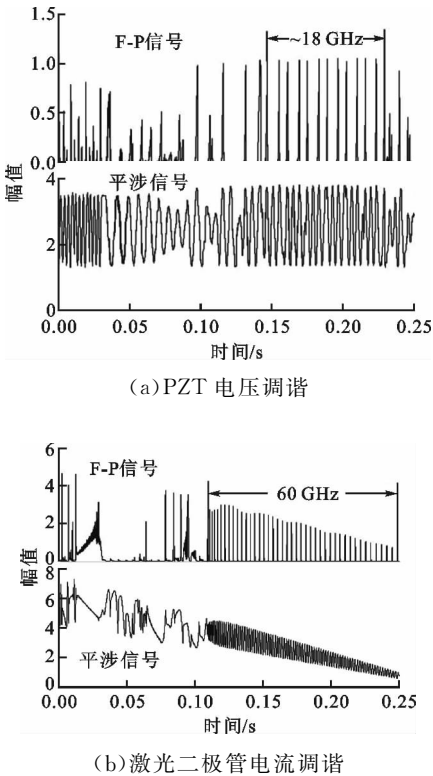


图 6 激光二极管电流调谐与 PZT 电压调谐

根据 1.2 节的分析,在 ECDL 频率扫描的过程中,避免发生跳摸的方法之一是使内外腔匹配的谐振模式不发生变化。因此,为了避免调谐过程中发生跳模现象,增大无跳模调谐范围,可通过电压与电

流同步调谐的方法使内外腔模式实现同步跟踪。根据式(15),激光二极管电流和 PZT 电压同步调谐的比例系数由 ECDL 各项参数 k 、 d 、 l 、 γ 和 θ 确定。然而,不同的半导体激光二极管的 γ 值都不相同,而要获得激光二极管的 γ 值则需要大量的实验;机械加工精度与装配精度将严重影响 l 的值;此外,由于 PZT 存在滞回特性^[9], k 值也难以具体确定下来。

为了解决上述问题,提出了一种基于实验的估计方法:将激光器控制器调节为恒流模式输出,离散改变电流的大小;在不同的电流位置通过信号发生器使 PZT 驱动器输出 0~75 V 的三角波电压;记录不同电流时干涉信号的波形。所记录的波形信号比较复杂,将其局部进行放大如图 7 所示。从图 7 可以看出,由于激光器对于电流变化非常敏感,因此在不同电流值的同一跳模位置的波形有所不同,电流增大同一跳模位置相对向右移动。ECDL 扫过一个外腔自由光谱范围,PZT 驱动电压改变量约为 1.2 V,扫过一个内腔自由光谱范围,电流改变量为 1.4 mA,于是可以得到电流改变量与电压改变量的比值,即同步调谐系数约为 1.17 mA/V。

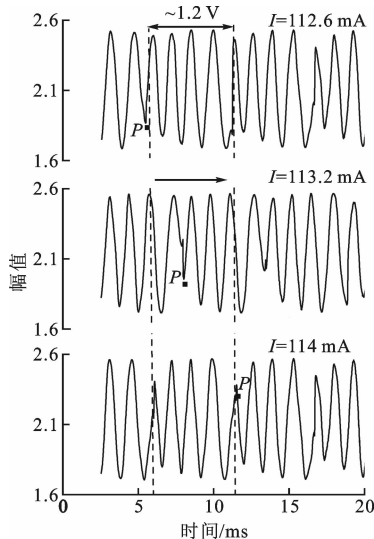


图 7 干涉信号在不同电流值的局部放大图

根据 ECDL 内外腔模式同步调谐系数,同步调节激光器二极管电流和 PZT 驱动电压实现激光光频扫描,PZT 电压扫描频率达到 20 Hz。用 F-P 标准具测量同步调谐的 ECDL 扫频光谱可知,同步调谐 ECDL 无跳模调谐的范围达到了 105 GHz,如图 8 所示。比较图 8 与图 6 可知,运用同步调谐方法实现 ECDL 光频连续扫描,不仅能够有效增大连续无跳模调谐范围,并且所得到 F-P 信号与干涉信号也要优于之前的方法。由于在调谐过程中电流也在

发生变化,因此 F-P 信号和干涉信号幅值受到电流调制,在实际应用中只需要经过简单的解调即可。

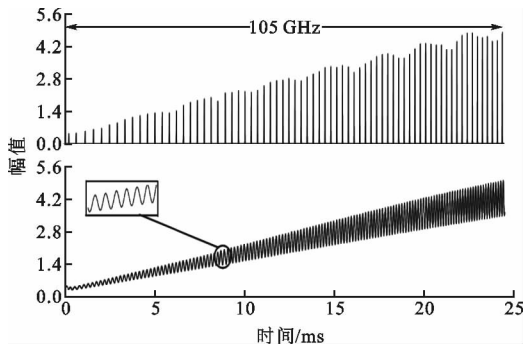


图 8 驱动频率为 20 Hz 时 105 GHz 的连续无跳模调谐

3 结 论

本文分析了 Littman 型外腔可调谐半导体激光器通过二极管注入电流与 PZT 电压同步调节进行连续无跳模调谐的基本原理,研制了一台采用无镀膜激光二极管的 Littman 型外腔可调谐半导体激光器,采用实验估计的方法确定了激光二极管注入电流与 PZT 扫描电压同步调谐比例系数。实验结果表明:所研制的激光器通过单独调节 PZT 电压来改变反射镜角度的方式进行调谐,可以实现约 18 GHz 的连续无跳模调谐,单独采用电流调节可以实现 60 GHz 的连续无跳模调谐,而采用同步调节 PZT 电压与二极管注入电流,可以实现 105 GHz 的连续无跳模调谐,频率调谐的扫描频率为 20 Hz。这一性能指标满足了激光光频扫描干涉测距的要求^[12-13],降低了对零部件加工与装配精度要求,克服了采用无镀膜激光二极管的外腔可调谐半导体激光器的跳模现象难以控制的难题。

参考文献:

- [1] WIEMAN C E, HOLLBERG L. Using diode lasers for atomic physics [J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(1): 1-20.
- [2] 陶龙, 刘志刚, 吕涛, 等. 频率扫描干涉仪漂移误差正反向扫描补偿法 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 115-119.
TAO Long, LIU Zhigang, LÜ Tao, et al. Drift error compensation method of frequency sweeping interferometer by consecutive forward and reverse optical frequency scanning [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 115-119.
- [3] PETRIDIS C, LINDSAY I D, STOTHARD D J M, et

(下转第 40 页)