

使用外腔半导体激光器对远距离微小振动的干涉测量*

江鹏飞^{1,2}, 张静娟¹, 赵伟瑞², 谢福增²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要:采用中心波长为 942.4 nm, 线宽大于 3.6 nm 的半导体激光器, 使用 Littrow 型自准直光栅外腔结构, 得到功率恒定、模式单一稳定、线宽优于 1.2 MHz ($\Delta\lambda < 3.5 \times 10^{-6}$ nm) 的激光输出; 使用正弦光频调制方式完成了对远距离的微小振动(纳米量级)的测量, 对振动的幅值和频率都具备良好的探测效果。

关键词:干涉测量; 微振动测量; 外腔半导体激光器; 窄线宽

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0253-03

Long distance microvibration measurement using external-cavity semiconductor laser *

JIANG Peng-fei^{1,2}, ZHANG Jing-juan¹, ZHAO Wei-rui², XIE Fu-zeng²

(1. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: With Littrow-type external-cavity grating and temperature controlling, the spectral line width is compressed to be less than 1.2 MHz ($\Delta\lambda < 3.5 \times 10^{-6}$ nm), while the original line-width of the semiconductor laser is broader than 1200 GHz. Based on this, the system for measuring the amplitude and frequency of the microvibration with sinusoidal modulation is designed, detecting effect is good.

Key words: Interferometry; Microvibration measurement; External-cavity semiconductor laser; Narrow bandwidth

0 引言

振动测量在现代机械、航空、航天领域中具有重要应用, 它不但可用于机械结构动态特性分析、机械系统的故障诊断和振动源的测量等方面, 而且在消除

噪声中也发挥着重要的作用^[1,2], 其检测精度可达 $\lambda/100$ 以上^[3], 且有很高的测量重复性。该方法可对光学系统波像差和精密光学零件面形误差进行非接触检测, 还可实现对长度、距离、位移、振动和运动速度等物理量的高精度非接触测量。干涉测量要达到优良的精度, 对光源提出了极高的要求, 大多数干涉仪

收稿日期: 2003-06-08; 修订日期: 2003-08-10

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(60277027)

作者简介: 江鹏飞(1978-), 男, 江西余干人, 硕士, 主要从事外腔半导体激光器、激光干涉仪和纳米精度测量方面的研究。

的光源均使用 He-Ne 激光器或氩离子激光器,而这类激光器由于体积、启动电压等因素严重影响了干涉测量系统的集成化和实用化。半导体激光器(LD)具有体积小、质量轻、输入电压小、易于调制^[4]等优点,使得干涉测量系统的集成化、实用化变为可行。但半导体激光器本身光束发散、光束的相干性较差,若不对光束进行整形并压窄其线宽,依然不能有效地应用于干涉测量系统中。为此,采用闪耀光栅外腔方式^[5],结合温控等手段,使半导体激光器的各项性能得到了显著的改善。实验中使用 942.4 nm 半导体激光器,单管线宽约为 1.2×10^3 GHz,而经过了外腔的选模,其线宽已被压窄为 1.2 MHz 以下,完全满足了长光程干涉测量中对光源的要求。采用正弦光频调制,并设计简洁的光路形式,实验中对远距离微小振动的幅值和频率的测量都得到了令人满意的探测结果。

1 光栅外腔半导体激光器

利用 Littrow 自准直方式实现的外腔半导体激光器结构如图 1 所示。从图中可看出,闪耀光栅工作于 Littrow 自准直结构状态,其中一级衍射光反馈至 LD,零级反射光作为输出。由于一级衍射光的线宽较窄,利用它的反馈,可以极大地改善激光器的线宽与模式。图中 θ 既是入射角,又是一级衍射光的衍射角。可通过转动光栅或传统的电流调制方式来改变回馈 LD 的光束波长,以实现调谐。该结构的优点是光路结构简单,缺点是若采用单面出光的 LD,则在依靠转动光栅对波长进行调谐时,将由于转动光栅而改变输出光的方向。

本实验所用的半导体激光器由中国科学院半导体研究所研制,中心波长为 942.4 nm, $\Delta\lambda$ 为 3.6 nm,频宽大于 1200 GHz。单管阈值电流为 53 mA,额定输出 101 mW,在出射端面镀有增透膜。外腔光栅选用 1200 线/mm 的衍射光栅,衍射效率为 20%。LD 的 PN 结面与光栅刻线平行(使出射光的偏振方向平行于光栅的刻线方向),在 LD 与光栅之间采用消色差透镜进行耦合。采取焊接的方法将制冷器固定在激光器上,使制冷器与激光管之间不会因温度的变化而产生裂隙和形变,以保持良好的导热率。温控精度

为 $1\%^\circ\text{C}$,工作温度设定为 20.0°C 。采用 Littrow 自准直反馈方式,外腔长度为 6 cm(从激光器出射端至光栅的距离)。

在外腔反馈下得到了稳定的激光输出,如图 2 所示,上方为加置外腔时的 $P-I$ 曲线,下方为管芯本身的 $P-I$ 曲线。与无外腔反馈时不同的是, $P-I$ 曲线在阈值附近没有平滑的过渡细节,而且在阈值电流以上,曲线的线性度良好,在长时间内(10 h 以上)无跳模,激光器的阈值电流被显著地降到 15.8 mA,而且阈值点以上的 $P-I$ 曲线线性度也大为改善,这将更加有利于对激光器的功率控制和以后的波长调谐。

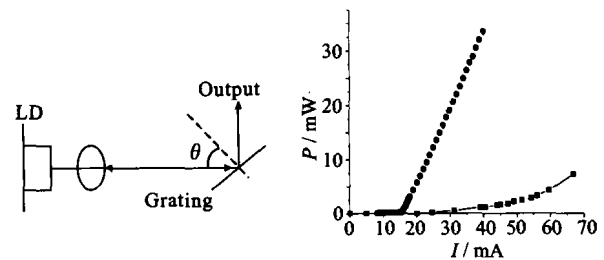


图 1 Littrow 外腔结构示意图

Fig. 1 The sketch map of Littrow-type external-cavity

图 2 使用光栅外腔前后的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 2 The output power current characteristics without grating and with grating

采用 Coherent 公司 Model 216 光谱分析仪测量,此时激光器的线宽已被压窄至 1.2 MHz 以下, $\Delta\lambda < 3.5 \times 10^{-6}$ nm。在线宽为 1.2 MHz 的情况下,激光的相干长度已能达到 250 m,完全适用于长光程的干涉测量。

2 测量系统

将干涉法用于振动测量时,考虑到环境扰动和被测量的影响,干涉场光强应为:

$$I(x, y, t) = I_r(x, y) + I_t(x, y) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_t(x, y)} \cos[\Phi_0(x, y, t) + \Phi_d(x, y, t) + \Phi_v(x, y, t)] \quad (1)$$

式中 $\Phi_0(x, y, t)$ 为两相干光束间的初始位相差; $\Phi_d(x, y, t)$ 为环境扰动引入的两相干光束间的位相差; $\Phi_v(x, y, t)$ 为所测振动引入的两相干光束间的位相差。为方便,令:

$$\Phi(t) = \Phi_d(x, y, t) + \Phi_v(x, y, t) \quad (2)$$

对于迈克尔逊型干涉光路,与 $\Phi_v(x, y, t)$ 的变化相对应的光程差的变化 ΔL 为:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4\pi} \Phi_v(x, y, t) \quad (3)$$

式中 λ 为所用光源的波长; ΔL 为所测振动引起的被测元件受迫振动的振幅,这一振动对应于干涉条纹的往复移动,若将一光电点探测器置于干涉场中,即可得到由振动引起的光强变化,进而求得 $\Phi(t)$ 或 ΔL 。

由公式(1)可知,干涉场的光强为余弦分布,具有双值性,因此,当 $\Delta L > \frac{\lambda}{2}$ 时,干涉条纹将发生多于一个条纹的移动。所测振动的振幅应是发生镜像拐点前干涉条纹的移动个数与半波长的乘积,振动频率为单位时间内出现的拐点数。

为求得 $\Phi_v(x, y, t)$ 并同时消除杂散光的影响,一般是对两相干光束间的位相差进行高频正弦调制:

$$\varphi(t) = \Delta\varphi \sin\omega t \quad (4)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为光波频率的调制幅度。

为了简便,设初始位相差 $\Phi_0(x, y, t) = 0$,公式(1)变为:

$$I(x, y, t) = I_r(x, y) + I_t(x, y) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_t(x, y)} \times \cos[\Delta\varphi \sin\omega t + \Phi(t)] \quad (5)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为位相调制幅度; ω 为调制角频率。

用光电点探测器探测公式(5)所示信号,并经隔直和基频、倍频滤波后得:

$$V_{1\omega}(x, y, t) = 4J_1(\Delta\varphi)\sqrt{I_r(x, y)I_t(x, y)}\sin[\Phi(t)]\sin\omega t \quad (6)$$

$$V_{2\omega}(x, y, t) = 4J_2(\Delta\varphi)\sqrt{I_r(x, y)I_t(x, y)}\cos[\Phi(t)]\cos 2\omega t \quad (7)$$

式中 J_1 、 J_2 皆为贝塞尔函数。 $V_{1\omega}(x, y, t)$ 、 $V_{2\omega}(x, y, t)$ 分别与 $\sin\omega t$ 、 $\cos 2\omega t$ 进行相关运算处理,得到:

$$V_1(x, y, t) = 4AJ_1(\Delta\varphi)\sqrt{I_r(x, y)I_t(x, y)}\sin\Phi(t) \quad (8)$$

$$V_2(x, y, t) = 4BJ_2(\Delta\varphi)\sqrt{I_r(x, y)I_t(x, y)}\cos\Phi(t) \quad (9)$$

式中 A 、 B 分别为两相关电路的增益。通过调节电路增益,使信号 $V_1(x, y, t)$ 和 $V_2(x, y, t)$ 的幅值相等,之后,再将两信号经除法及反正切电路处理,得:

$$V(x, y, t) = \Phi(t) = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{\sin\Phi(t)}{\cos\Phi(t)} \right\} \quad (10)$$

一般环境扰动的频率在100 Hz以下,因此将公式(10)的信号经低通滤波求得 $\Phi_d(x, y, t)$,并将其作为反馈控制信号^[6],改变两相干光束间的位相差,从而对环境扰动的影响进行补偿。同时,将公式(10)的信号经高通滤波处理即可得到 $\Phi_v(x, y, t)$,根据公式(3),求出 ΔL ,再根据极值及拐点的判断,即可得到所测振动的信息。

3 实验结果

在与目标距离5 m以上时,系统对被测振动(100 Hz~20 kHz)表现出良好的探测以及抗干扰能力,采用的这一系统实现了大范围、远距离、高精度、无接触的微振动测量,对探测表面无需精确的对准,而且光路设计和电子学技术方案简单易行;若使用线宽更窄、功率更大的外腔半导体激光器作为干涉光源,本系统的性能会大大改善,在工业生产以及国防安全等领域都将有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] Sasaki O, Okazaki H. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement[J]. Appl Opt, 1986, 25(18): 3137-3140.
- [2] Wang X Z, Sasaki O, Takebayashi Y. Sinusoidal phase-modulating Fizeau interferometer using a self-pumped phase conjugator for surface profile measurements[J]. Opt Eng, 1994, 33(8): 2670-2674.
- [3] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1997.
- [4] Notomi M, Mitomi O, Yoshikuni Y. Broad-band tunable two-section laser diode with external grating feedback[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1990, 2(2): 85-87.
- [5] Harvey K C, Myatt C J. External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating[J]. Optics Letters, 1991, 16(12): 910-912.
- [6] Takamasa Suzuki, Osami Sasaki, Shuich Takayama, et al. Real-time displacement measurement using synchronous detection in a sinusoidal phase modulating interferometer[J]. Opt Eng, 1993, 32(4): 1033-1037.