

多模激光调节相干长度外差干涉技术

方仲彦

(清华大学精仪系, 北京 100084)

韩 森

(长春光机学院光电工程系, 长春 130022)

提要 研究了一种采用多模半导体激光与耦合光纤、采取声光调制及调节相干长度的外差干涉系统。该系统具有功率大、分辨率高、测头小、不接触等优点。实验证明,该系统达到优于 1 nm 的分辨能力,可用于人体耳膜振动特性的测试与研究。

关键词 多模激光, 相干长度, 耳膜测量

1 引 言

测量人体耳膜的振动特性,无论在医学上(耳膜诊断、人造耳膜等)还是在工业上(听觉传感器、机器人等)都有着重要意义。耳膜振幅范围小,然而振幅分辨率高($<1\text{ nm}$)。它要求不接触测量,而且测头直径不大于 2 mm。另一个技术难点是耳膜表面反射率极低,一般 $<0.1\%$,而入射能量又不允许太大,以免损伤细胞组织,因此要求测量仪器具有极高的灵敏度与抗干扰能力。本项研究就是为了实现对人体耳膜的测量而进行的。

根据耳膜测量的要求,采用光学外差干涉与光纤技术是适宜的。光学外差干涉技术具有抗干扰能力强的优点,光纤技术则易于实现测头柔性及微型化。然而干涉仪光源的选择比较困难,单模激光不仅昂贵,而且与单模光纤耦合也比较困难。如同测量表面粗糙度的干涉显微镜采用白光作干涉仪光源那样,多模半导体激光也可以作为干涉仪光源使用,它与通常用作干涉仪光源的单模激光相比具有体积小、功率大、价格便宜,而且比较容易与光纤耦合等优点。多模半导体激光用作干涉仪光源最大的障碍是其相干长度短,必须在干涉仪两臂等光程条件下使用,而且测量范围小。然而对于耳膜测量,采用多模半导体激光,正是扬其所长而避其所短,可以收到很好的效果。文献[1]的作者对于多模半导体激光的特性及在干涉测振方面的应用前景进行了分析与探讨。文献[2]的作者对于光学外差干涉技术进行了充分的研究。本文研究采用多模半导体激光,采取调节相干长度的办法实现外差干涉测量,取得亚纳米级的分辨率,有望用来解决诸如测量人体耳膜振动特性这类难度较高的课题。

图 1 是本实验系统所采用的 40 mW 多模半导体激光器(SONY SLD 202 U-3)的光谱结构,图 1(a)是整个纵模光谱,图 1(b)是局部放大。半导体激光的稳频主要靠控制其温度及注入电流,该激光器具有 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 的温控精度及 $\pm 0.1\text{ mA}$ 的电流稳定性。该激光器的中心波长 $\lambda = 0.813\text{ }\mu\text{m}$,相邻模间距 $\Delta\lambda = 0.35\text{ nm}$,分布几乎均匀一致。根据干涉仪理论,对于等间隔多谱线光源,当两臂光程差为 $\lambda^2/2\Delta\lambda$ 的偶数倍时,干涉仪对比度 $K = 1$,当光程差为 $\lambda^2/2\Delta\lambda$ 的奇

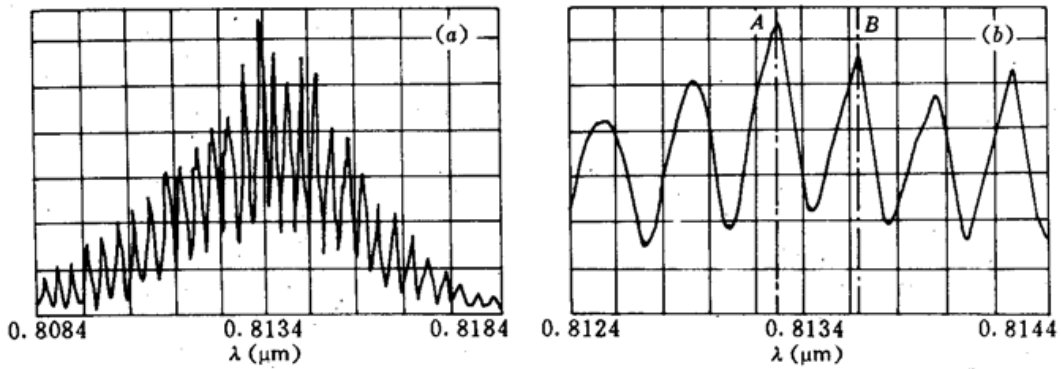


Fig. 1 Spectral structure of a multi-mode laser diode

数倍时, $K = 0$, 本例中

$$\frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} = \frac{(0.813 \times 10^{-3} \text{ mm})^2}{2 \times 0.35 \times 10^{-6} \text{ mm}} = 0.95 \text{ mm}$$

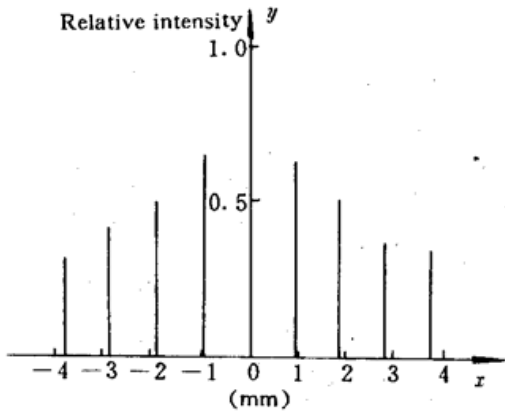


Fig. 2 Regularity of signal, shown by the peaks of the interference fringes

x : distance (mm); y : signal intensity (arbitrary units)

实验中证实了这一现象。如图 2 所示,在等光程位置(原点)干涉信号出现主极大,当测量镜向前或向后移动时,由于相干长度短,干涉信号很快消失,然后每间隔 0.95 mm(注意由于测量镜移动产生二倍光程关系)出现一个次极大,次极大的强度逐渐减弱,直至最后消失。实际应用一般均选等光程条件,即干涉信号主极大位置进行测量。

相干长度按图 1 的包络线半宽度 $\delta\lambda$ 计算为

$$L = \frac{\lambda^2}{\delta\lambda} = \frac{(0.813 \times 10^{-3} \text{ mm})^2}{4 \times 10^{-6} \text{ mm}} = 0.165 \text{ mm}$$

可见该干涉系统信号可测范围是有限的。

2 测量原理

图 3 描述了测量系统的工作原理。由多模半导体激光 LD 发出的光束在 A 处进入二路复用耦合光纤。输出端 B 的表面镀有部分反射部分透射膜层,激光束在 B 端一部分输出至被测表面 C。光束由 C 返回重新进入光纤后与由 B 表面直接反射返回的光束一同经 D 端射出,经声光调制器 AOM 后,零级光直接传播至分光镜 F,而一级光产生布拉格偏转经反射镜 E 转向 F。两束光在 F 处会合后由光电探测器 PD 接收。

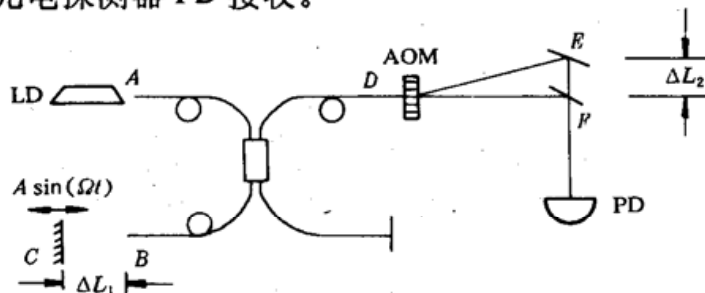


Fig. 3 Shows the principle of measurement

由测量原理图可知,该系统实际上由二个干涉仪组成,在 BC 段构成法布里 - 珀洛干涉仪,

而 DE 段则构成外差干涉仪。探测器 PD 可以收到以下四个光波信号

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_1 e^{i\omega t} && (\text{路径 } A - B - D - F) \\
 E_2 &= E_2 e^{i(\omega t + \phi_1)} && (\text{路径 } A - B - C - D - F) \\
 E_3 &= E_3 e^{i(\omega t + \omega_b t + \phi_2)} && (\text{路径 } A - B - D - E - F) \\
 E_4 &= E_4 e^{i(\omega t + \omega_b t + \phi_1 + \phi_2)} && (\text{路径 } A - B - C - D - E - F)
 \end{aligned}$$

式中, E_1, E_2, E_3, E_4 为常数, ω 为多模半导体激光 LD 的中心频率, ω_b 为声光调制器 AOM 的频率, ϕ_1 为 BC 段法 - 珀白干涉仪的相位差, ϕ_2 为 DE 段外差干涉仪的相位差。不难看出

$$\begin{aligned}
 \phi_1 &= \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta L_1 + A \sin(\Omega t)] \\
 \phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L_2
 \end{aligned}$$

式中, λ 为多模半导体激光 LD 的中心波长, ΔL 为 BC 之间的距离, A, Ω 为被测面 C 的振幅与频率, $\Delta L_2 = (\overline{DE} + \overline{EF}) - \overline{DF}$ 。

合成光强

$$\begin{aligned}
 I &= (E_1 + E_2 + E_3 + E_4)(E_1^* + E_2^* + E_3^* + E_4^*) \\
 &= (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \\
 &\quad + (2E_1E_2 + 2E_3E_4)\cos\phi_1 + (2E_1E_3 + 2E_2E_4)\cos(\omega_b t + \phi_2) \\
 &\quad + 2E_1E_4\cos(\omega_b t + \phi_2 + \phi_1) + 2E_3E_4\cos(\omega_b t + \phi_2 - \phi_1)
 \end{aligned}$$

由于 ΔL_1 与 ΔL_2 远大于多模半导体激光的相干长度, 所以无论是 BC 段的法 - 珀干涉仪还是 DE 段的外差干涉仪, 都不能产生干涉信号。即 E_1 与 E_2, E_3 与 E_4 均不能相干, 至于 E_1 与 E_4 则更不可能相干。只有当 $\Delta L_2 = 2\Delta L_1$ 时, E_2 与 E_3 是等光程光波信号, 符合相干条件。所以上述合成光强前四项均转化为直流信号, 只有最后一项才是能探测到的干涉信号。由于

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi A}{\lambda} \sin(\Omega t) = \Phi \sin(\Omega t)$$

因此光电探测器输出的信号经滤去直流分量后为

$$u(t) = u_0 \sin\left[\omega_b t + \frac{4\pi A}{\lambda} \sin(\Omega t)\right]$$

解调此信号便可测出被测物体的振幅 A 与频率 Ω 。

3 测量系统与实验结果

图 4 是测量系统结构图。系统采用了 40 mW 多模半导体激光器 LD, 80 MHz 声光调制器 AOM 及与光源谱线匹配的光电探测器 D。法拉第偏转器 F 按 45° 放置, 其作用是防止激光回授。平行平板玻璃 PPP 用于调节光纤耦合, 半波片 $\lambda/2$ 用于调整偏振方向。系统采用保偏光纤提高抗干扰能力, 光纤探头采用了一个直径为 2 mm 的自聚焦透镜 G。等光程条件的调节依靠精密移动反射镜组 S 来实现, 经过精确调整, 在等光程位置, 当被测物表面 M 用平面反射镜代替时, 光电探测器输出的信号其信噪比很好。图 5、图 6 分

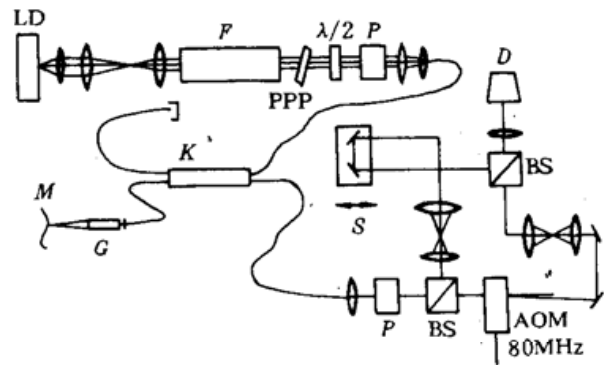


Fig. 4 Optical schematic of the testing system

图 5、图 6 分

别是由频谱仪与示波器接收到的外差干涉信号与 AOM 驱动信号的比较图。实测该系统输出信号的相位稳定性,每次采样 500 个值,其 $\Delta\phi$ 的 $RMS < 0.1^\circ$,即

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta A}{\lambda} < 0.1^\circ$$

则

$$\Delta A = \frac{\lambda\Delta\phi}{4\pi} \leq \frac{0.813 \mu\text{m} \times 0.1^\circ \times \pi}{4 \times \pi \times 180^\circ} = 0.11 \text{ nm}$$

可见该系统具有 $< 1 \text{ nm}$ 的位移测量精度,有希望用于人体耳膜振动特性的测量与研究。

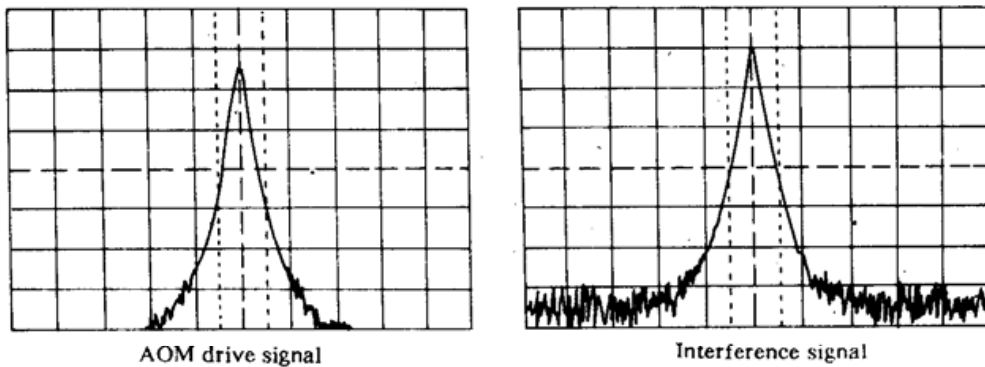


Fig. 5 Spectral comparison of the interference signal with the AOM driving signal

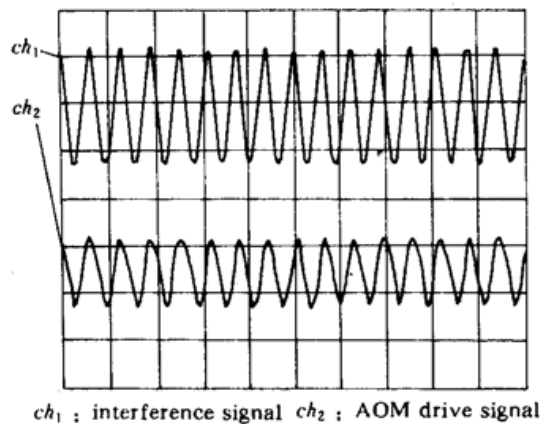


Fig. 6 Comparison of interference signal with the AOM driving signal

致谢 研究工作得到德国斯图加特大学工程光学所的蒂齐阿尼教授(Prof. Dr. H. J. Tiziani)及菲歇博士(Dr. H. Fischer)的支持与指导,清华大学精仪系邬敏贤教授对论文提出宝贵意见,在此一并感谢。

参 考 文 献

- 1 Y. N. Ning, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer *et al.*, A novel optical heterodyne vibration sensor shema, preserving directional information and using a short coherence length source. *Opt. Commun.*, 1991, 85: 10~16
- 2 E. R. Fischer. Doppelheterodyn-interferometrie zur profil-und abstandsmessung an optisch rauhen oberflächen, Berichte aus dem ITO der Universität Stuttgart, August 1994. 163~190

An Optical Heterodyne Interferometer Using a Multi-mode Laser Source to Modulate Coherent Length

Fang Zhongyan

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Han Sen

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Abstract This paper describes a measuring system basing on an optical heterodyne interferometer, which utilizes a multi-mode laser diode and coupled optical fibers to adjust the coherent length of the system. The sensor is small and works under a non-contact condition. It is proved experimentally that this system's resolution reaches into quasi-nm, making possible the detection of the vibrating characteristics of the human ear membrane.

Key words multi-mode laser, coherent length, ear membrane measurement

45 fs 掺铬氟化锂锶铝激光器

掺铬氟化锂锶铝($\text{Cr}^{3+} : \text{LiSrAlF}_6$)晶体,是最近几年研制成功的新型、近红外宽带可调谐激光器,调谐范围在 750~1000 nm。我们用氩离子激光器泵浦 Cr : LiSAF(为 $\text{Cr}^{3+} : \text{LiSrAlF}_6$ 的简写)晶体,实现了自锁模运转,获得了 45 fs 的光脉冲。采用的实验装置如图所示。 M_1, M_2 为 $R = 100 \text{ mm}$ 的全反射镜, M_4, M_5 为 $R = 50 \text{ mm}$ 的全反射镜, M_3 为平面全反射镜, M_6 为透过率为 1% 的平面输出镜, P_1, P_2 为 ZF₁ 弥散补偿棱镜,泵浦光束经过焦距为 10 cm 的透镜聚焦到晶体上。晶体为 $\phi 6 \times 20 \text{ mm/mm}$ 的圆形棒,棒的两端切成布儒斯特角,棒掺杂浓度 1.7%,折射率为 1.4。棒用 50 μm 厚的铟皮包裹,装在铜的冷却管中用水冷却。

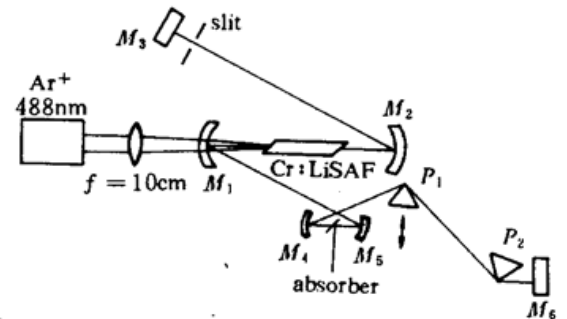


Fig Experimental setup of the Cr : LiSAF laser

由于 Cr : LiSAF 晶体的非线性较钛宝石晶体弱,一般在不加外界扰动的条件下难于实现自锁模运转。为获得锁模运转,在腔内加入微量染料 Neocyanine。当在 M_4, M_5 之间加入乙二醇后(不加染料 Neocyanine),可观察到不稳定的锁模运转。如果再加少量 Neocyanine 染料,调节腔镜便可得到稳定的锁模运转。当泵浦功率为 1.8 W,染料浓度为 $2 \times 10^{-5} \text{ M}$ 时,得到最短光脉冲为 45 fs,输出平均功率为 15 mW。脉冲的中心波长为 830 nm,谱宽 21 nm,光脉冲的时间带宽乘积 $\Delta t \cdot \Delta \nu = 0.412$ 。实际上,根据此光谱宽度可支撑的极限光脉冲宽度为 34 fs,这主要是补偿还没有达到最佳化,进一步优化腔的设计可获得更短的光脉冲。

(中国科学院西安光机所 阮双琛 侯 洵 王水才
陈国夫 丰 善 收稿日期:1996年4月1日)