

强抗干扰型正弦调制式半导体 激光有源干涉仪

艾 勇

(湖北师范学院物理系, 黄石市 435002)

提要 叙述了强抗干扰型正弦调制式半导体激光有源干涉仪(Laser diode active interferometer)的工作原理。它比目前的半导体激光有源干涉仪的抗干扰能力提高了 50%。还给出了各种实验结果。

关键词 半导体激光器, 干涉计, 调制

1 引 言

光学干涉仪广泛应用于各种高精度测量领域,包括物体的形状、折射率分布、振动及位移的高精度测量。但普通波面点相干的光学干涉仪的一个最大弱点是对测量环境要求较高,有振动存在时便无法进行正常测量,这就使得光学干涉仪的普及应用受到了局限。半导体激光器的出现使这种情况得到了改善。半导体激光器除了具有体积小、重量轻、寿命长的特点外,最重要的一个特点是它的发射频率随着它的注入电流的变化而变化,利用这个特点,国外近些年开发出一种具有很强的抗干扰能力的半导体激光有源干涉仪^[1]。这种干涉仪不仅克服了传统的干涉仪所不能克服的缺点,而且还具有几个新的功能。

2 工作原理

半导体激光器的激光发射频率随它的激励电流的变化而变化,而且有着很好的线性关系(图 1),可写成 $f = f_0 + \chi I$ 的形式,变化率 χ 在 4 GHz/mA 左右,变化率 χ 对于交流调制电流的响应带域在 10 kHz 以上(图 2)。

用半导体激光器(LD)作为光源的有源干涉仪的基本构成如图 3 所示,这里使用的是泰曼-格林型干涉仪。由图可见,此干涉仪由半导体激光器(LD)、透镜 L 、半反射镜 BS、反射镜 M_1 、 M_2 、针孔 d 、光电管 PD_1 和放大器组成。 PD_2 和 A_2 用来观测干涉条纹的变化情况。从 BS_1 到 M_1 和 M_2 的距离差为 D ,两光束间的光程差为 $2D$ 。当激光频率为 f ,真空中光速为 c 时,由此光程差引起的位相差为

$$\delta = 4\pi f D / c \quad (1)$$

如果用位相差来表示干涉信号强度 P ,则有

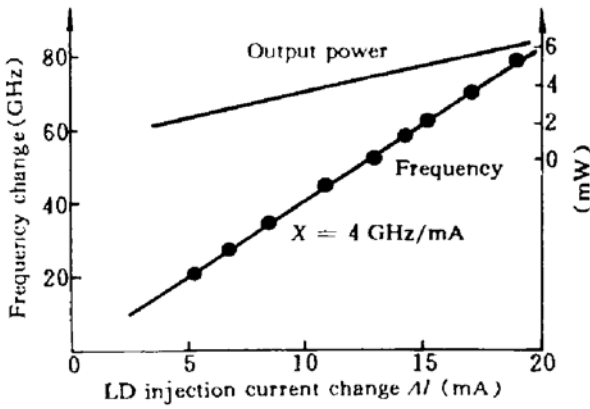


Fig. 1 Measured dependence of laser diode frequency on injection current

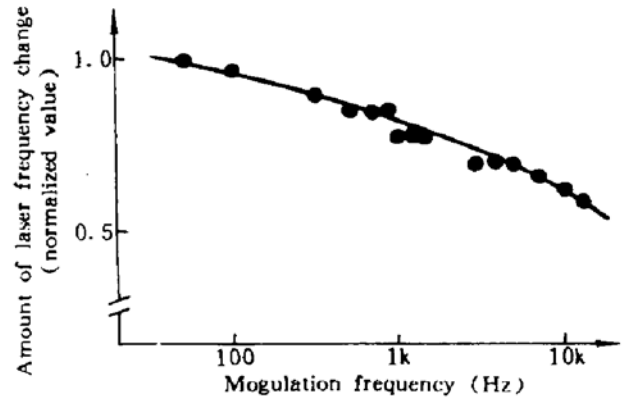


Fig. 2 Frequency response of laser frequency tuning measured as a function of modulation frequency of the diode current

$$P = a + b \cos \delta \tag{2}$$

a 和 b 是与光学系统的反射率等因素有关的常数.

当反射镜 M_1 或 M_2 的位置随时间发生变化, 或者干涉仪受到外部的振动影响, 光程差随时间而变化, 引起干涉条纹的不稳定, 因此无法正常观测干涉图样. 如能对依赖于 D 或 f 的 δ 的变化作适当补偿, 实现使 P 保持恒定的话, 就达到了干涉仪的稳定, 而 δ 由两个变量 f 和 D 组成, 只要使 f 和 D 的乘积保持恒定就行, 所以当 D 增加或减少时, 反方向调节 f 值就可实现 δ 的不变, 也即实现了 P 的不变, 利用半导体激光器的发射频率随注入电流的变化而变化的特点, 可以提高 P 的稳定度.

用光电管在干涉信号的某一点检测出强度的变化信号, 经放大处理后以变化电流的形式反馈至 LD 中, 这个反馈电流为

$$I = A(P - P_0) \tag{3}$$

这里 A 的单位为 mA/mW. 由这个反馈电流而引起的光频率变化为

$$f = f_0 + XI \tag{4}$$

式中 f_0 是由直流偏置电流引起的光发射频率. 由式(1), (3) 和(4) 可推出信号强度 P 与两光束间的位相差 δ 间的关系为

$$P = P_0 - \frac{f_0}{\chi A} + \frac{c}{4\pi D \chi A} \delta \tag{5}$$

由上式可知 P 与 δ 为直线关系. 由(2) 式和(5) 式可求出稳定解, 采用图解法. 图 4 表示了(2) 式和(5) 式的图解关系. 直线与曲线的交点为稳态解, 注意只有那些直线的斜率大于曲线的斜率的交点才为稳态解. 当光程差变化 ($D \rightarrow D + \Delta D$) 时, 直线(5) 的斜率随之变化. 这样, 伴随着交点的移动, 引起位相 $\Delta \delta$ 的变化, 从(5) 式可知, 当放大倍数 A 为无穷大时, 不论 δ 或 D 如何变化, 干涉信号 P 都保持不变, 即干涉仪被稳定化了. 可是 A 的值过大时, 电路容易发生振荡, 所以有必要找出适量的 A 值, 使得既能保证干涉仪的稳定又能避免电路的振荡发生.

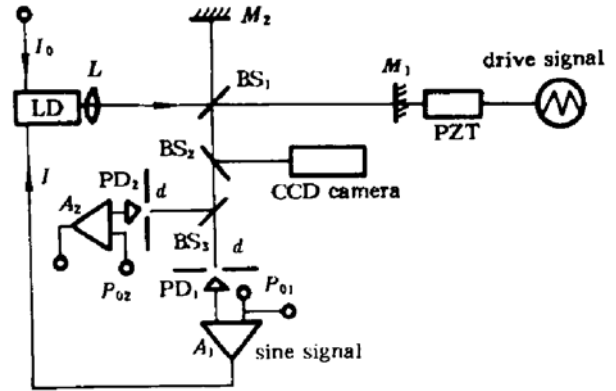


Fig. 3 Schematic diagram of a Twyman-Green interferometer

作为稳定化的指标,用 $\Delta P/\Delta D$ 的值来评价, ΔP 是因 ΔD 的产生而引起的。 $\Delta P/\Delta D$ 的值越小,说明针对光路差的变化,干涉信号的变化也越小,此时干涉仪的工作状态愈接近稳定化状态,一般用无反馈状态下的 $[\Delta P/\Delta D]_{\text{off}}$ 值与加有反馈状态时的 $[\Delta P/\Delta D]_{\text{on}}$ 值的比来表示反馈的效果,这个比值越大,说明由反馈而带来的稳定化愈好。这个比值用稳定化度 S 来表示,即

$$S = \frac{[\Delta P/\Delta D]_{\text{off}}}{[\Delta P/\Delta D]_{\text{on}}} \quad (6)$$

而

$$\frac{\Delta P}{\Delta D} = \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \cdot \frac{\Delta \delta}{\Delta D} \quad (7)$$

由(2)式有

$$\frac{\Delta P}{\Delta \delta} = -b \sin \delta \quad (8)$$

因这个比值与反馈没有关系,所以 S 用 $\Delta \delta/\Delta D$ 的比来表示。

$$S = \frac{[\Delta \delta/\Delta D]_{\text{off}}}{[\Delta \delta/\Delta D]_{\text{on}}} \quad (9)$$

分别求 $[\Delta \delta/\Delta D]_{\text{off}}$ 和 $[\Delta \delta/\Delta D]_{\text{on}}$ 的值,对(2)和(5)式进行全微分后可得

$$\left(\frac{\Delta \delta}{\Delta D}\right)_{\text{on}} = \frac{4\pi f}{c} \left/ \left(1 + \frac{4\pi D \chi A b}{c} \sin \delta\right)\right. \quad (10)$$

$$\left(\frac{\Delta \delta}{\Delta D}\right)_{\text{off}} = \frac{4\pi f}{c} \quad (11)$$

则有

$$S = 1 + \frac{4\pi D \chi A b}{c} \sin \delta \quad (12)$$

从(12)式可求出既能满足电路不发生振荡又能使干涉仪保持一定稳定度的 A 值来,反之,知道 A 值后则可求出 S 值。

如图 4 所示,当干涉仪受外界振动影响时,光程差变化 ΔD 作正负交替变化,当 ΔD 较小时,工作点在 R 点附近移动,当 ΔD 较大时,工作点将以 R 点为中心以较大的幅度作上下摆动,可能发生越过 N 点向 O 点跳跃的情况,此时干涉条纹出现不稳定。如能使直线(5)与 P 轴的交点 Y_0 作与工作点运动方向相反的以 Y_0 为中心的适当幅度的上下运动即可使工作点作小幅度摆动,避免跳跃现象发生,从而达到提高干涉仪的稳定度的目的。

可以证明,在 ΔD 较小,直线截距的变化量 $\Delta P = Y - Y_0$ 满足下式时,可使工作点保持不变,即实现了干涉仪的完全稳定化

$$\Delta P = \frac{f_0}{\chi A} \left(1 - \frac{D}{D + \Delta D}\right) \quad (13)$$

D 为变化前的光程差。当 ΔD 按正弦函数变化时,有

$$\Delta P = \frac{f_0}{\chi A} \left(1 - \frac{D}{D + S_0 \sin \omega t}\right) \quad (14)$$

ΔP 与 ωt 之间的关系如图 5 所示,从图中可看出它的波形与正弦函数同周期,反相且较接近。所以可以采用在放大器的参考信号端加上适当幅度大小的正弦调制信号来使干涉仪的工作点尽量保持稳定。

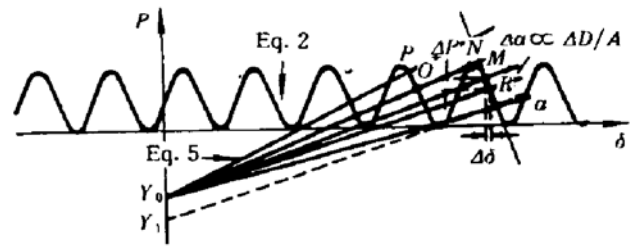
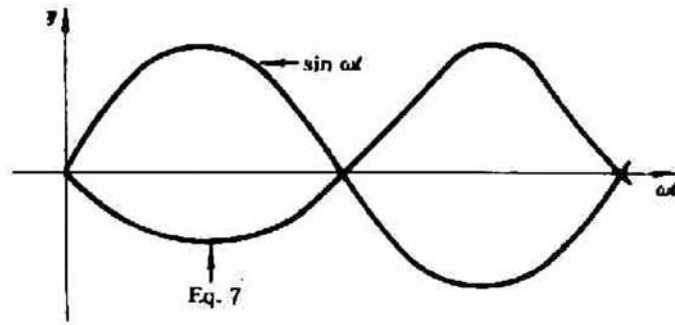


Fig. 4 Graphical relation of stationary states of the feedback system

Fig. 5 The relation of the Eq. 7 to $\sin \omega t$

3 实 验

干涉仪的稳定化实验装置如图 3 所示,使用的 LD 为日立 HL7806G 型,干涉信号透过针孔 d 后被光电管 PD 来检测。同时,通过 BS_2 将一部分强度的干涉信号反射到 CCD 摄像机,通过与之相连的电视监视器来观察干涉图样。

为了验证干涉仪的抗干扰能力,全部实验都是在普通的机械性噪音较大的环境下进行。为模拟较强的外部机械性振动, M_1 与压电位移器 (PZT) 相连接, PZT 受锯齿波信号 (频率为 100 Hz) 驱动而使 M_1 产生振动,在未加反馈信号,干涉仪不受外界干扰的情况下,通过电视监视器可看到稳定的干涉图样存在,当使 M_1 产生幅度为 $4 \mu\text{m}$ 的振动时,经光电管 PD_2 检测的条纹强度信号大幅度变化,干涉图样一片模糊。加上反馈信号后,尽管 M_1 的振动依然存在,却可观察到稳定的干涉图样。

但当 M_1 的振动幅度增大到 $9 \mu\text{m}$ 时,干涉图样出现模糊现象 (图 6),通过 PD_2 检测出的条纹强度变化波形如图 7 所示,波形出现较严重的畸变现象,表明直线 (5) 与曲线 (2) 式的交点发生了较严重的跳跃现象,条纹抖动严重,故出现模糊,当在 A_1 的参考信号端接上一个幅度大小合适的与 M_1 振动同频率的正弦调制信号后,干涉图样立刻变得清楚可见 (图 8),且图 7 中的畸变全部消失,这说明干涉仪的工作点 (交点) 在小范围内移动,没有发生跳跃情况。

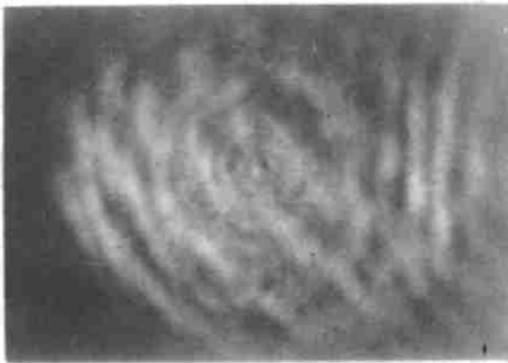


Fig. 6 The case of no sinusoidally synchronized differential modulation

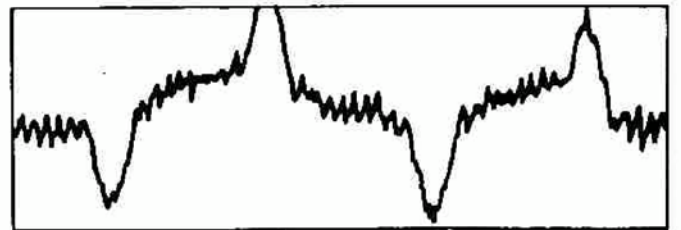


Fig. 7 The case of no sinusoidally synchronized differential modulation

继续增大 M_1 的振动幅度时,仍可得到清晰的条纹,本实验中,使 PZT 的位移量达到最大时 ($15 \mu\text{m}$ 以上),条纹仍保持清晰,图 9 至图 11 为通过 PD_2 检测到的不同振动振幅情况下的条纹强度变化情况,图 10 为不加正弦调制信号的情况,此时条纹一片模糊,波形畸变严重。图中上图为锯齿波信号,表示了振动振幅情况,下图为条纹强度变化波形。

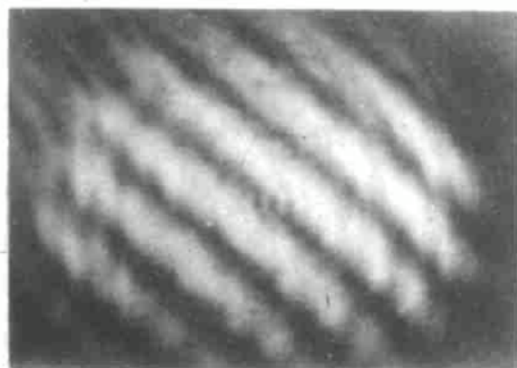


Fig. 8 The case of using sinusoidally synchronized differential modulation

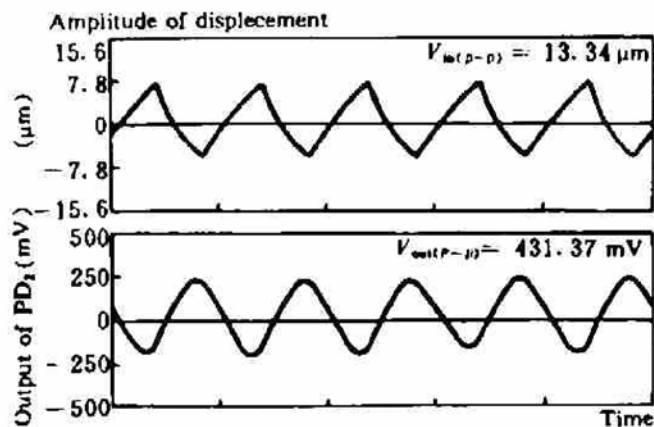


Fig. 9 The case of using sinusoidally synchronized differential modulation

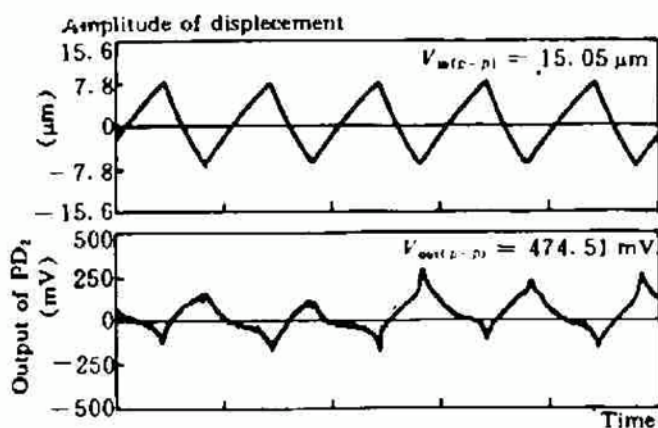


Fig. 10 The case of no sinusoidally synchronized differential modulation

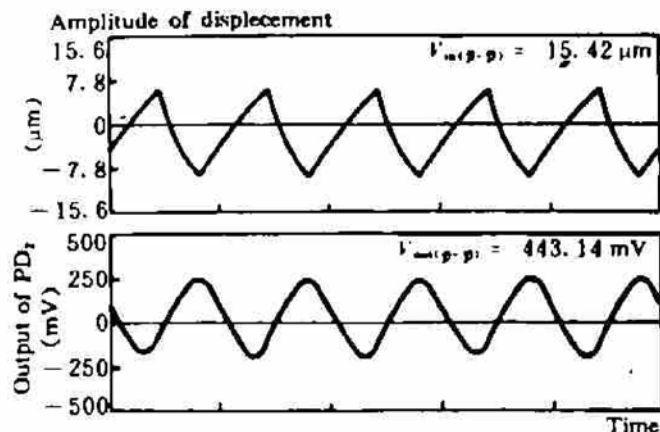


Fig. 11 The case of using sinusoidally synchronized differential modulation

实验还观察了不同振动频率下的条纹波形输出情况,实验证明,在 500 Hz 以下的情况下,干涉仪都能正常工作,这说明在普通的机械性噪音存在的情况下,正弦调制法是一种有效的提高干涉仪抗干扰能力的方法。

4 讨 论

半导体有源干涉仪在用本论文所提出的方法进行改进后,可大大提高干涉仪的抗干扰能力,本方法的局限性在于正弦调制频率必须严格等于振动物体的振动频率,这就要求先测出振动物体的振动频率。 M_1 作大振幅振动时,若两频率不是严格相等,即会出现工作点“游动”现象,即工作点以一定的周期间隔发生跳跃现象,从电视监视器上也观察到了干涉图样时而清晰时而模糊的“拍频”现象,可求出拍频:

$$f = |f_1 - f_2|$$

式中 f_1 、 f_2 分别为正弦调制频率和振动频率。在上式中 f_1 是已知的,如能测得拍频 f ,则可求出振动频率 f_2 。

利用作者提出的另一种方法——光路差补偿法^[3]后,可不需了解振动物体的振动频率就可提高干涉仪的稳定能力。

参 考 文 献

- 1 T. Yoshino, M. Nara. *Appl. Opt.*, 1987, 26(5): 892~897
- 2 艾 勇, 大坪顺次. 正弦调制式高安定半导体激光干涉计. 日本京都: 92年光学大会论文集, 3~4
- 3 艾 勇. 光路差补偿式高安定半导体激光干涉计. 日本东京: 93年第40届全国应用物理大会论文集, Vol. 13: 915

Laser Diode Active Interferometer with the Strong Ability of Eliminating Environmental Disturbance by Using Sinusoidally Modulation

Ai Yong

(Physics Department, Hubei Normal University, Huangshi 435002)

Abstract The paper describes the operation principle of laser diode active interferometer that with the strong ability of eliminating environmental disturbance by using sinusoidally synchronized differential modulation. The ability of eliminating environmental disturbance of this kind of interferometer is raised by more than 50% compared with interferometer that with nomodulation.

Key words laser diode, interferometer, modulation