

用多模半导体激光器实现动态定位的研究

韩劲松 赵 洋 李达成 曹 芒 王 佳

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

提要 提出了一种新的半导体激光定位技术。它利用多模半导体激光器的光谱分布引起的干涉条纹的强度分布来确定等光程差点。干涉仪体积小, 信号处理简单, 系统性能稳定, 可以在大范围内捕捉零点。

关键词 多模, 半导体激光器, 零光程差点, 动态定位

1 引 言

长期以来, 在精密测量中比较成熟的定位技术是白光干涉定位技术。其动态定位精度达到百分之几微米^[1]。白光定位的基本思想是用白光作光源构成迈克尔逊干涉仪, 以干涉仪的等光程差点作为定位基准。由于白光的光谱很宽, 利用干涉条纹零级极大的幅值最大可以判定零光程差点^[1]; 也可以选用白光中的两种波长 λ_1 和 λ_2 , 以它们极大值点的符合判别出零光程差点^[1,2]。

80 年代以来, 半导体激光器的性能有了极大的提高, 从而使它的一些特殊性质在精密测量中也有了日见广泛的应用。如利用它的线性调频特性可以进行大尺寸绝对距离测量^[3]。本文提出一种新的半导体激光定位方法。它以多模半导体激光器构成干涉仪。相对于普通半导体激光器, 多模半导体激光器的光谱较宽, 达零点几纳米至几纳米, 可以通过干涉条纹的强度分布来检测等光程点。

半导体激光定位的精度虽然比白光定位的精度低, 但它的优点是体积小, 可以很容易地在 大范围内实现准直; 对干涉仪设计的要求较低; 信噪比高, 一般可达 40~50 dB; 相干距离长, 对定位的初始位置要求不高, 捕捉范围很大。因而在许多场合仍然具有实际意义。

2 定位原理

多模半导体激光定位的原理与白光定位的原理相同, 都是利用非单色光干涉条纹的强度分布来确定零光程差点。但白光是很宽的连续光谱, 达几百纳米, 而多模半导体激光的光谱只有零点几到几纳米, 而且并不连续。图 1(a) 所示为 SONY 公司的 SLD201V 型半导体激光器的光谱分布^[4], 它的干涉模型与白光不尽相同。为了讨论方便, 我们把多模半导体激光的光谱分布简化成图 1(b) 的情形。假设它们: (1) 每个纵模的幅值相等, 模宽均为 $\Delta k, k = 2\pi/\lambda$; (2) 纵模间距相等, 都等于 δk ; (3) 纵模分布范围有限, 从 $k_0 - n\delta k$ 到 $k_0 + n\delta k$, 纵模中心位置为 $k_0 + i\delta k$,

其中 $-n \leq i \leq n$ 。

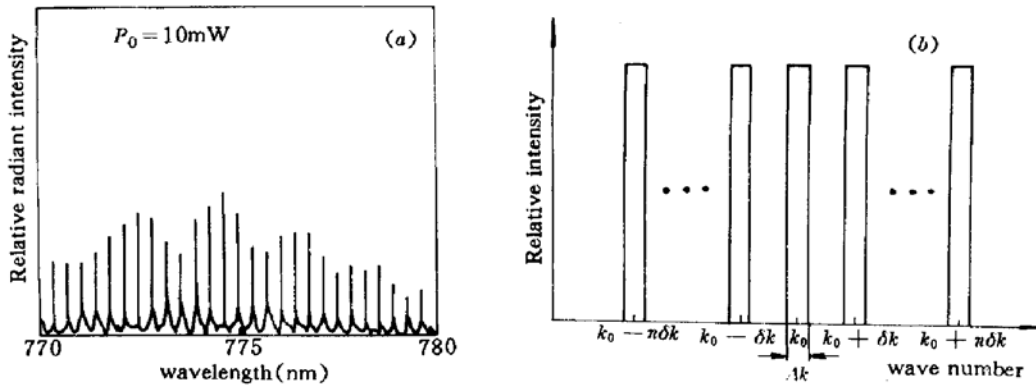


Fig. 1 Spectrum of a diode laser

(a) a real spectrum; (b) the simplified model

在迈克尔逊干涉仪中,如果两臂的光程差为 d ,假设 $d < \lambda_s$, λ_s 为单个纵模的合成波长, $\lambda_s = \lambda_s^2 / \Delta\lambda$ 。则纵模 i 各光谱成份相干的光强分布为

$$I_i = \int_{k_i - \Delta k/2}^{k_i + \Delta k/2} 2I_0(1 + \cos k_i d) dk = 2I_0 \Delta k \left\{ 1 + \frac{\sin[(\Delta k/2)d]}{\Delta k(d/2)} \cos(k_i d) \right\} \quad (1)$$

半导体激光器在整个光谱范围内的各个纵模产生的总的光强分布为

$$I = \sum_{i=-n}^n I_i = 2(2n + 1)I_0 \Delta k + 2I_0 \Delta k \frac{\sin[(\Delta k/2)d]}{(\Delta k/2)d} \sum_{i=-n}^n \cos[(k_0 + i\delta k)d] \quad (2)$$

由三角公式可以推出

$$I = 2(2n + 1)I_0 \Delta k + 2I_0 \Delta k \cos k_0 d \frac{\sin\left(\frac{\Delta k}{2}d\right)}{\frac{\Delta k}{2}d} \times \frac{\sin\left(\frac{(2n + 1)\delta k}{2}d\right)}{\sin\left(\frac{\delta k}{2}d\right)} = D + 2I_0 \Delta k \cdot C \cdot S \cdot M \quad (3)$$

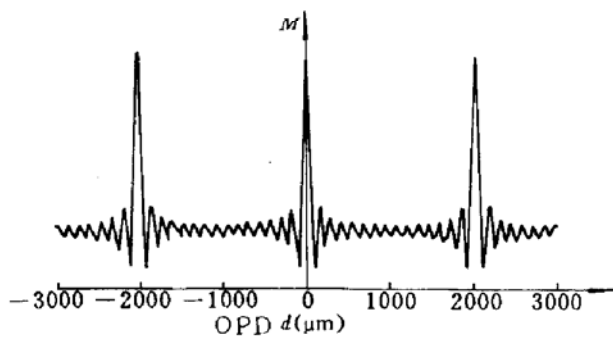


Fig. 2 Influence of multi-mode factor on the intensity distribution of the interference fringes

其中 $D = 2(2n + 1)I_0 \Delta k$ 是直流项, $C = \cos(k_0 d)$ 是干涉项。它们对定位不起作用。 $S = \sin[(\Delta k/2)d] / (\Delta k/2)d$ 为单模模宽调制项,由于 Δk 很小,该项随 d 的增加衰减很慢,也不能直接用于定位。我们最关心的是多模调制项 $M = \sin[(2n + 1)\delta k/2]d / \sin(\delta k/2)d$ 的影响。它对干涉条纹起着锐化作用,对零点定位的贡献最大。

单独考虑 M 的作用。以 SLD201V 为例,取与 δk 相对应的 $\delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$, $n = 15$ 。则 M 随光程差 d 变化的曲线如图 2 所示。

从图中可以看出,多模项显著地增加了干涉条纹包络的明锐程度。在同样的光谱范围内,这种锐化作用随 n 的增大而增大。事实上,当 d 趋近于零时,有

$$\lim_{d \rightarrow 0} M = \frac{\sin\left(\frac{(2n + 1)\delta k}{2}d\right)}{\sin\left(\frac{\delta k}{2}d\right)} = (2n + 1) \frac{\sin\left(\frac{(2n + 1)\delta k}{2}d\right)}{\frac{(2n + 1)\delta k}{2}d} \quad (4)$$

其中系数 $(2n + 1)$ 表示光强求和,而表示光强变化的是 $\sin[(2n + 1)\delta k/2]d / [(2n + 1)\delta k/2]d$ 。

它表明多模项在零点附近的锐化作用相当于一个从 $k_0 - n\delta k$ 到 $k_0 + n\delta k$ 的连续光谱的作用。对于 SLD201V, 其多模分布的宽度达 10 nm, 可以计算出多模项 M 的相对强度 M/M_0 随光程差的分布(其中 M_0 是当 $M = 0$ 时 M 的值), 如表 1 所示。其中零级极大的半宽 $\Delta d \approx 36 \mu\text{m}$ 。在这个范围内, 达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的定位精度是不成问题的。

Table 1 Relative intensity distribution of the multi-mode modulation factor versus OPD

OPD d (μm)	0	± 5	± 10	± 15	± 20	± 25	± 30	± 35	± 40
Relative intensity (M/M_0)	1.000	0.988	0.955	0.901	0.827	0.738	0.637	0.528	0.414

Table 2 Ratio of every maximum to zero order maximum with the influence of the single-mode modulation

Order	0	± 1	± 2	± 3
Ratio	1.000	0.887	0.594	0.234

但是多模项本身不能分辨它的零级极大和其它级次的极大, 这就必须依赖于单模宽项 S 的调制作用。仍以 SLD201V 为例, 取与 Δk 相对应的 $\Delta\lambda = 0.08 \text{ nm}$, 则单模宽调制和多模调制的综合作用 $S \cdot M$ 可以用图 3 表示。

从图中可以看出, 单模宽宽的调制作用使多模项的各级极大值出现了强度分布。在上述条件下, 各级极大与零级极大的比值如表 2 所示。用一个简单的电压比较器就可以选出零级极大。

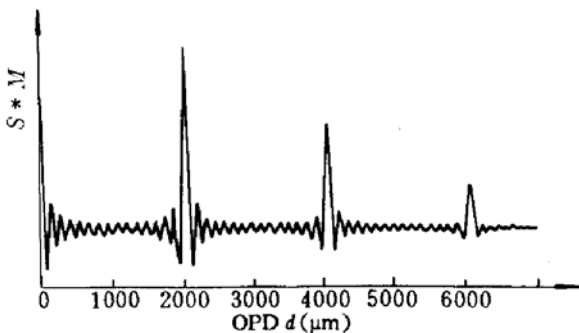


Fig. 3 Synthetic effect of mode-width modulation and multi-mode modulation

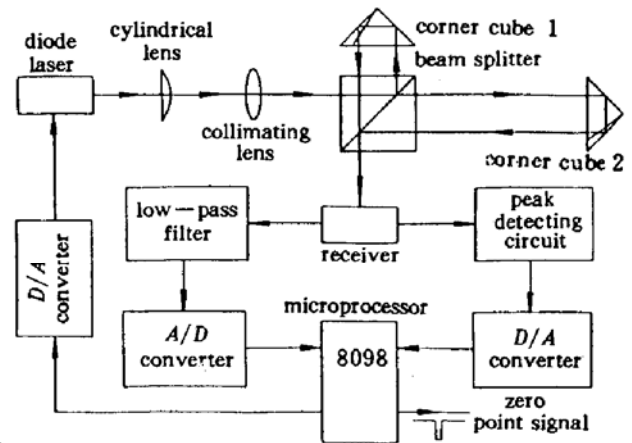


Fig. 4 Block diagram of the multi-mode dynamic positioning arrangement

3 定位装置

图 4 是用多模半导体激光器零点定位的装置框图。整个装置包括迈克尔逊干涉仪和信号处理部分。在干涉仪中用一个多模半导体激光器作光源。当驱动电流一定时, 激光器的输出功率并不是一个定值, 而是时间温度的函数。由于信号处理中要提取干涉信号的峰值, 所以要求激光器保持恒定的功率输出。系统中接收器接收的干涉信号经低通滤波器后取出直流分量, 它正比于光功率。经 A/D 后送入 8098 单片机系统; 再由单片机系统计算出驱动电流的变化量, 经 D/A 后反馈给激光电源。从而完成对恒定光功率输出的闭环控制。

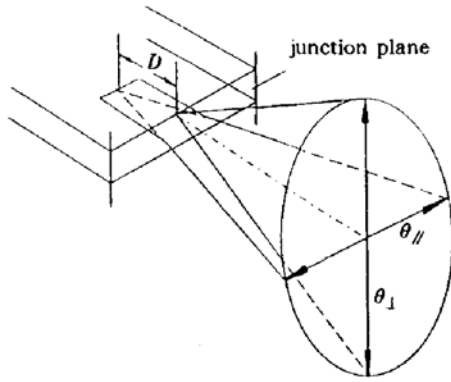


Fig. 5 Schematic diagram showing the amount of astigmatism (D) in a diode laser

μm 。它严重影响了激光器的准直效果,甚至无法测量或定位。所以在设计干涉仪时必须消除像散的影响。最简单的办法就是用一片柱面透镜。如果柱透镜位于激光器和准直镜之间,则柱面透镜的半径为

$$R = \frac{\varphi^2}{8nD(1 - \cos u)} \quad (5)$$

其中 φ 为透镜的有效孔径, D 为半导体激光器的像散, n 为透镜折射率, u 取准直镜入射角和半导体激光器发射角之间的小者。

如果柱面透镜放在准直镜之后,可以假设它们都是薄透镜,而把像散当作离焦,于是柱面透镜的焦距取决于下式

$$\frac{1}{F_{\text{cly}}} = \frac{1}{F_{\text{coll}}} - \frac{1}{F_{\text{ast}}} \quad (6)$$

其中 F_{cly} 和 F_{coll} 分别为柱面透镜和准直镜的焦距, F_{ast} 等于准直镜的焦距加上半导体激光器的像散值^[5]。

4 实验结果

按照图 4 的实验装置,我们用东芝的 TOLD9200 多模半导体激光器进行了动态定位实验。角锥棱镜 2 的运动速度为 $200 \mu\text{m/s}$ 。TOLD9200 的性能参数^[6]为:波长 670 nm , 发光功率 3 mW , 像散 $40 \mu\text{m}$ 。实验以德国 Feinpruf GmbH 公司的 1254D 电感测微仪(分辨率 $0.1 \mu\text{m}$ 档)为标准,比对半导体激光零点定位的重复精度。电感测微仪是位移传感器,本身不能提供零点的标准。之所以只比对半导体激光零点定位的重复精度,是因为实用中的零点定位往往是和长度测量联系在一起的,绝对的零点定位在测量中的意义并不重大,但定位的重复精度则直接影响长度测量的精度。

实验表明,多模半导体激光器动态定位的零点捕捉范围可达 $\pm 15 \text{ mm}$, 远远超过白光的捕捉范围($2 \sim 3 \mu\text{m}$)。准直距离超过 10 m , 可以在 $0 \sim 10 \text{ m}$ 远的距离上进行零点定位,这也是白光定位难以做到的。与电感测微仪的比对结果表明,多模半导体激光器动态定位一次开机的一次定位精度 (3σ) 为 $\pm 1.4 \mu\text{m}$, 长时间测量的定位精度 (3σ) 为 $\pm 2.8 \mu\text{m}$; 多次开机的重复精度 (3σ) 为 $\pm 1.7 \mu\text{m}$ 。以上是未加图 4 中的光强闭环控制条件下由硬件判读得到的初步实验结果。发光功率的变化直接影响了定位的精度,所以长时间测量的定位精度有所降低。如果完成

由于采用了单片机系统,接受到的干涉信号只需经过简单的峰值提取电路即可送入单片机进行数据处理。这样使信号处理的方法更加灵活,定位结果的可靠性和重复性都有所提高。

在干涉仪中引入了一片柱面透镜,其作用在于消除半导体激光器的像散。如图 5 所示,半导体激光器发出的波前是柱面形的,垂直于结平面的光腰仍位于半导体激光的发射面上,但平行于结平面的光腰却有一个向后的偏移 D 。这个轴向的偏移 D 就是半导体激光器固有的像散。对于多模半导体激光器,像散一般都很大,达到 $40 \sim 50$

了光强的闭环控制,并加以软件处理,整个定位精度还可以提高。

参 考 文 献

- 1 李茂山. 双光束白光干涉条纹光强随光程差变化的动态分布. 计量研究, 1980, 4:15~24
- 2 罗镇伟. 白光干涉条纹动态定位的一些问题及其方法的探讨. 计量测试, 1980, 3:1~8
- 3 武勇军, 李达成, 曹 芒. 线性调频半导体激光绝对测长技术. 航空计测技术, 1993, 4:2~4
- 4 Sony. Laser Diode Guide Book. Printed in Japan, revised 1990. 64~66
- 5 Michael Lang. Correcting astigmatism in diode lasers. *Lasers & Optronics*, 1989, 8(9):51~55
- 6 Toshiba. Laser diode with visible wavelength 650 nm to 685 nm product guide. 1992

Research on Dynamic Positioning Using a Multi-mode Diode Laser

Han Jingsong Zhao Yang Li Dacheng Cao Mang Wang Jia

(*Department of Precision Instrument and Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract A new positioning technology employing a diode laser is proposed in this paper. With the wide spectrum of a multi-mode diode laser, the intensity distribution of its interference fringes can be used to find the zero OPD point. The interferometer is small and available, the signal processing is simple, and the zero OPD point can be searched in a large range.

Key words multi-mode, diode laser, zero OPD point, dynamic positioning