

自聚焦棒干涉仪的设计原理及其应用研究

李长英 杨培农* 王 诺

(西北大学物理系激光教研室, 西安 710069)

汪翠莲 曹庆林 程希望

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

提 要

本文分析并研究了用自聚焦棒做成的干涉仪。并用偏振滤波的方法有效地减少噪声,大幅度提高接收光强,使干涉条纹清晰可见,方便了检测系统。并对其应用作了一些初步的探讨和实验。

关键词: 自聚焦棒, 干涉仪, 光纤传感器。

一、前 言

光学中的干涉法是已知的灵敏的探测技术之一。目前,利用被测对象在光纤中光波的相位变化来探测各种物理量的各种光纤干涉仪已日益广泛地得到了应用。本文详尽阐述了它的工作原理,并对其应用作了开拓性的探讨。

二、原理与理论

1. 自聚焦棒干涉仪原理

如图1所示,由He-Ne激光器发出的632.8 nm的光束经起偏器 P_1 后,再经过半反射镜BS射到自聚焦棒GL上,从棒的前端面 M_1 反射的光由于偏振方向与偏振片 P_2 起偏方向垂直,不能进入光探测器中,而从棒的后端面 M_2 和反射镜 M_3 反射的光再经过自聚焦棒后,与偏振片 P_2 起偏方向一致的分量满足相干条件形成干涉条纹,并被光探测器接收由信号处理系统给出实验数据。

2. 自聚焦棒内光的传输

自聚焦棒中的干涉光路,如图2所示。自聚焦棒实质上是一种粗的多模梯度光纤。众所周知,在多模光纤中传输的模式很多,每一模式通过光纤时经历不同的传播滞后或时延差。若在多模光纤内传播的光波相位延迟在光源相干时间范围内,则光纤输出端,或经透镜在其后的屏幕上任一点的光强都是多模相干叠加的结果,形成颗粒状的亮斑或暗斑的散斑场分布。

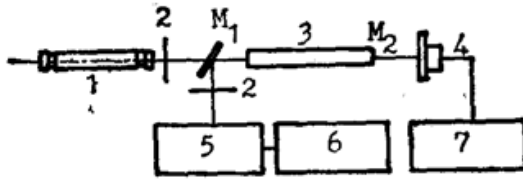


Fig. 1 Schematic diagram of self-focus bar interferometer

- 1) He-Ne laser 2) P_1, P_2 : polarizing plate,
 3) GL: self-focusing bar, 4) PZT: piezoquartz,
 5) light detector,
 6) processing system of the signal,
 7) Super-low frequency signal generator



Fig. 2 Self-focusing bar interferometer

本实验中 He-Ne 激光位于自聚焦透镜后,在面上形成散斑场分布,在物面上亦为散斑场分布,这样 M_2 面反射光与 M_3 面反射光相干将是散斑场的叠加,场中某点强度可表示为:

$$\left. \begin{aligned} I &= |R + O \exp i\delta|^2 = R^2 + O^2 + J_{12}, \\ J_{12} &= A \cos \delta = 2RO \cos \delta, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 R 为自聚焦棒后端面 M_2 反射的参考光束, $O \exp i\delta$ 为 M_3 面反射的物波信号。 δ 为相干波的电矢量各个对应分量的相位差,两个独立的散斑图相干叠加得到的第三个图中包含了干涉项 J_{12} 的信息,即随相位差 δ 变化出现的强度涨落。

自聚焦棒中的光场分布为高斯型。自聚焦棒和反射镜之间的耦合功率与端面 M_2 和反射镜 M_3 之间的距离有关,归一化功率耦合系数取决于孔径匹配因子和光束的发散角与光纤数值孔径的匹配因子。根据理论分析,归一化耦合系数对相干光 K_2 和非相干光 K_1 分别为^[2]:

$$K_1 = a_0^2 \{ (a + cz)a_0 + [b + (a + d)z + cz^3]\theta_0 \}^{-2}, \quad (2)$$

$$K_2 = [1 - \exp(-2a_0^2/w'^2)] [1 - \exp(-2a_0^2/w_0^2)]^{-1}, \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} w_0 &= \lambda/\pi\theta_0, \\ w'^2 &= w_0^2 \{ (a + cz)^2 + (\lambda^2/\pi w_0^4) [b + (a + d)z + cz^2] \}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 a, b, c, d 为反射镜 M_3 的光线变换矩阵的矩阵元; a_0 为光纤芯半径; θ_0 为光纤输出光束的发散角; w_0 为光纤输出高斯光束腰半径; w' 为反射高斯光束在端面处的光束腰半径。归一化功率耦合系数是一个反映耦合相对强度的量,功率的绝对大小还与反射镜 M_3 的反射率,光纤端面的透射率和光源等因素有关。

由于 M_2 面的反射率很低,且 M_3 面与 M_2 面相距只有几毫米,因此 M_3 端面反射光强远大于 M_2 端面反射光强,为了提高 M_2 端面反射率,在端面 M_2 上镀上一层增反膜,以改善干涉条纹的对比度。

多膜光纤具有退偏作用,由 He-Ne 激光器输出的光经起偏器 P_1 后成为偏振光,偏振光射入光纤,而在光纤出射端已不再是偏振光,而且两个方向的偏振分量基本相等(模完全耦合)。入射端的光波,按光纤模式展开为

$$A_1 = X_i \sum_M a_m E_{1m}, \quad (5)$$

式中 X 为方向在纸面的单位矢量; E_{1m}, a_m 分别为某一导模的电场和振幅。设光纤无损耗, 在其出射端 M_2 的光振幅 A_2 为

$$A_2 = X_i \sum_M a'_{im} E_{1m} \exp(i\beta_m L) + Y_i \sum_M b'_m E_{2m} \exp(i\alpha_m L), \quad (6)$$

式中 L 为光纤长度; β_m 和 α_m 为对应的传输数常^[1]。由以上分析可知, M_2 和 M_3 面的反射光, 均为非偏振光, M_1 反射光为偏振光, 通过检偏器 P_2 后只有 M_2, M_3 反射光的垂直于纸面的偏振分量。这样, 就消除 M_1 反射光对信号的影响, 降低本底噪声并提高信噪比。

3. 信号接收与处理

光探测器接收到的光强转化成电信号为

$$V(t) = R^2 + O^2 + 2RO \cos \delta. \quad (7)$$

当在反射镜 M_3 后放置压电晶体(PZT), 用超低频信号发生器驱动时, 如果 M_3 面作频率为 δ_0 、振幅为 a 的正弦振动, 其位相 δ 将随时间变化为

$$\delta = \phi_0 + (4\pi a/\lambda) \sin 2\pi f_0 t, \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式, 并通过调整端面 M_2 和反射镜 M_3 的间距, 则得信号的变化 $\Delta V_1(t)$ ^[2]

$$\Delta V_1(t) = 4ROJ_1(4\pi a/\lambda) \sin 2\pi f_0 t. \quad (9)$$

实验中给压电陶瓷所加电压为锯齿波。锯齿波电压推动压电陶瓷作伸缩运动, 则 M_2, M_3 之间的光程差变化, 每隔 $\lambda/2$, 干涉条纹中心环发生一次亮暗变化。这样, 光探测器就每隔一个 λ 可探测到一次脉冲。由记录仪记下在一个锯齿波内的脉冲数, 如图 3 所示, 就可测得微振动振幅

$$\Delta L = (1/2)m\lambda. \quad (10)$$

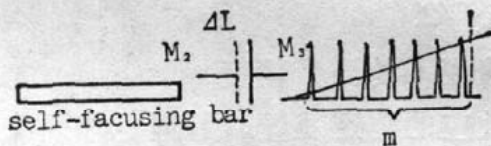


Fig. 3 Pulse number of a saw tooth wave recorded by the recorder



Fig. 4 Interference figure observed in experiment

三、实验与讨论

(1) 实验中所用的掺 Li 自聚焦棒, 直径为 1.8 mm, 数值孔径为 0.125 mm, 1/4 周期 ($P/4$) 为 13.9 mm, 分辨率 $\eta \geq 100$ l/mm, 总长为 96 mm。棒端面平面度要求很高, 垂直度不超过 $30''$;

(2) 采用 He-Ne 激光 632.8 nm 作光源, 当端面 M_2 未镀膜, 干涉条纹对比度很差, 经分析计算, 给 M_2 镀反射膜 $R \approx 49\%$ (镀 ZnS 和 MgF_2 膜) 干涉条纹的对比度明显提高, 条纹清晰, 肉眼可见;

(3) 实验中观察到了干涉条纹有平直干涉条纹、弯曲干涉条纹和园环形干涉条纹, 如图

4 所示;

(4) 观察到干涉条纹叠加在一由亮暗不均匀分布的光场上, 经分析为由于自聚焦棒透镜传输特性而造成的散斑光场;

(5) 实验中比较了加检偏器和未加检偏器两种情况下的干涉场。结果为加检偏器后光场强度虽有所减弱, 但本底噪声明显下降。由此得出了与理论分析相同的结果, 滤掉了 M_1 端面反射光所形成的噪声。实验证明, 本文作者研制的自聚焦棒干涉仪, 通过偏振、滤波、镀膜的方法有效地抑制了噪声, 提高了信噪比, 干涉条纹清晰可见, 方便了检测系统。

(6) 微振动振幅测量。实验装置如图 1 所示。当压电陶瓷上加以锯齿形电压时, 实验可记录中心圆环的亮暗变化。

自聚焦棒干涉仪的原理就是利用信号检测系统检测出干涉条纹的变化数 m , 然后根据 $\Delta L = (1/2)m\lambda$ 求出微小位移或微小振动的振幅, 如表 1 所列。

Table 1 Recorded data and Calculated results by wave-form scanning of interference fringe formed at $M_2 // M_3$

$V(V)$	$t(s)$	pulse number/cycle	cycle(s)	$\Delta L(\text{\AA})$	$r(\text{\AA}/s)$	备注
110	3.28	3	1.09	9492	2893.9	V—voltage applied to PZT $t(s)$ — waveform scanning time
110	8.5	3	2.83	9492	1116.7	
75	3.28	2	1.09	6328	1929.3	
75	8.5	2	2.83	6328	744.5	

自聚焦棒干涉仪还可进行速度测量, 原理如图 1 所示。则物体运动的速度为

$$v = (\lambda/2)T = \lambda/2T = \lambda f/2, \quad (11)$$

以足够精度测出各瞬时 T 或频率 f , 则可以保证瞬时速度 v 的测量精度。

另外, 作者还设计一种自聚焦棒干涉仪和多普勒效应的测速装置。原理也如图 1 所示。当光源频率为 f 的光入射到相对于观察者速度为 v 的运动的物体上, 从运动物体反射到观察者的光的频率变成 f_1 , 则有

$$f_1 = f[1 + (v/c)\cos\theta]. \quad (12)$$

当自聚焦棒 M_2 反射的光作参考光, 于是信号光(M_3 散射光)和参考光一起经光探测器进入频谱分析仪处理。最后, 分析仪指示出测量结果^[3]。

四、结 论

本文研制和设计的自聚焦棒干涉仪是一种新型的测量仪器。它可以测量许多物理量, 如微位移和微振动以及可以转化为微位移, 微振动的物理量。因为采用光学干涉法, 所以测量精度高, 有着广阔的应用前景。

- [2] 汤俊雄等;《光学学报》,1989, 9, No. 12 (Dec), 1092~1097。
[3] 雷玉堂编;《光纤及其传感技术》下册(武汉测绘科技大学,1989年9月版)。

Design principle of self-focusing bar interferometer and its application studies

LI CHANGYING, YAN PEINONG AND WANG NUO

(Laser laboratory, Physics Department, Northwest University, Xi'an 710069)

WANG CAILIAN CAN QINGLIN AND CHENG XIWANG

(Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica Xi'an 710068)

(Received 27 December 1990; revised 7 March 1991)

Abstract

This paper analyses and studies the interferometer made of self-focusing bar. polarized filtration is used to efficiently decrease the noise, the accepted light intensity is greatly improved, the interference fringes is clearly visible and the detection system is made convenient. Some preliminary exploratirn and experiments of its applition is done.

Key words: self-focusing bar; interferometer; light fiber sensor.

参 考 文 献

- [1] 林旦等;《光学学报》,1989, 9, No. 7 (Jul), 662~665。