

应用研究

光纤 Michelson 干涉仪干涉条纹对比度的研究

余瑞兰¹, 刘勇², 王安²

(1 安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241000;

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 通过实验测定了光纤 Michelson 干涉仪输出的干涉信号, 并由此计算了干涉条纹对比度。从条纹对比度的拟合曲线出发, 分析了可能影响光纤干涉仪干涉信号对比度的主要因素, 为实验中条纹对比度的进一步提高提供有益的参考。

关键词: 纤维光学; 光纤 Michelson 干涉仪; 干涉信号; 条纹对比度

中图分类号: TN929.11; TN253 文献标识码: A 文献编号: 1673-6141(2007)03-0231-05

Contrast of Interference Stripes in Optical Fiber Michelson Interferometer

YU Rui-lan¹, LIU Yong², WANG An²

(1 School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The interference signals of optical fiber Michelson interferometer were measured through experiments. The stripe contrast was calculated. From the fitting curve, possible factors were analyzed which effect the contrast of interference stripes in optical fiber interferometer. It can provide helpful references to improve the stripe contrast.

Key words: fiber optics; optical fiber Michelson interferometer; interference signal; stripe contrast

1 引言

由于光纤具有抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘性好、防爆、体积小、重量轻、可绕性好^[1]等特点, 而倍受广大科技工作者的关注^[1-3]。光纤 Michelson 干涉仪也正是利用了光纤的这些特性, 使光纤两臂可以绕成任意形状, 结构灵活, 避免了传统分立元件迈克尔逊干涉仪极高的环境和调整要求。因此,

它的应用可以延伸到许多传统干涉仪的禁区^[4]。再者, Michelson 干涉仪因具有结构简单、条纹对比度好、信噪比高、条纹的计数和被测位移的计算关系简单等优点而受到广泛的研究和应用^[5]。

本文通过实验测定了光纤 Michelson 干涉仪输出的干涉信号, 并由此计算了干涉条纹对比度。从条纹对比度的拟合曲线出发, 分析了可能影响光纤干涉仪干涉信号对比度的主要因素。

收稿日期: 2006-09-12; 修改日期: 2006-10-16

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金 (2006kj077B); 安徽师范大学青年基金项目 (2006xqn57)

E-mail: yuruilan@ah165.net

2 实验及测量原理

干涉仪的基本功能是产生两束相干光,并使相干光束以可控制的光程差相互干涉,从而给出干涉图。实验中采用波长为 632.8 nm 的稳频 He-Ne 激光做光源。单模光纤定向耦合器 FDC 的工作波长为 632.8 nm,端口为 2×2,分束比为 1:1,附加损耗为 0.07 dB。传感臂及参考臂光纤均为 Lightwave Technologies 公司生产的 F1506C 型单模石英光纤,在工作波长 632.8 nm 处的损耗为 10 dB/km,数值孔径为 0.11,阶跃折射率分布,芯径 4 μm,外径 125 μm,芯材料为玻璃。所用相位调制器为压电陶瓷管 (PZT),高度为 1.25 cm,外径为 1.80 cm,内径为 1.6 cm。光纤两干涉臂的端面镀上铝膜作为反射镜 M_1 、 M_2 。接收光源干涉信号的探测器选用的是响应时间短的光电倍增管,光谱范围为 185~900 nm。

光纤 Michelson 干涉仪的工作原理如图 1 所示, He-Ne 激光通过耦合透镜 L 进入单模光纤后被 FDC 分成强度相等的两束,分别进入参考臂和传感臂中传播。两干涉臂中传播的光经各自光纤端面的反射镜 M_1 、 M_2 反射重新返回光纤中,当干涉仪两个臂间的光程差小于光源的相干长度时,两束光在 FDC 的另一输出端将发生干涉。输出的干涉信号进入光电探测器 D 。这样光电探测器 D 就给出了干涉强度和两束光光程差之间的函数关系,这就是干涉图。

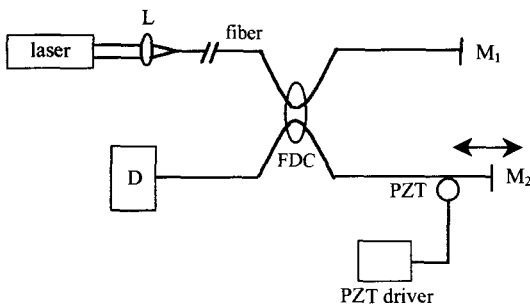


图 1 光纤 Michelson 干涉仪工作原理图

Fig.1 The schematic of optical fiber Michelson interferometer

设由 He-Ne 激光器输入到光纤中的光场为

$$E(t) = ae^{i(\omega t + \phi_0)}, \quad (1)$$

则由 M_1 反射到探测器 D 的光场为

$$E_1(t) = iaktr_1e^{i(\omega t + \phi_0 + 2\beta l_1)}, \quad (2)$$

而由 M_2 反射到 D 的光场为

$$E_2(t) = iaktr_2e^{i(\omega t + \phi_0 + 2\beta l_2)}, \quad (3)$$

其中 a 为入射光场的振幅, k 、 t 为 FDC 的振幅耦合系数和透过系数, l_1 、 l_2 分别为两光纤干涉臂的长度。 $i = e^{i\frac{\pi}{2}}$ 表示耦合器中耦合光束相对于透过光束有 $\pi/2$ 的相位延迟,传播常数 $\beta = 2\pi n/\lambda$,从而探测器的输出信号为

$$I = |E|^2 = |E_1 + E_2|^2 = PKT(1 - \gamma_0) \times [R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1R_2} \cos 2\beta(l_1 - l_2)], \quad (4)$$

其中 $P = a^2$ 为输入到光纤中的光功率, $K = k^2$ 为光纤耦合器的功率耦合系数, $T = t^2$ 为功率透过系数, γ_0 为插入损耗系数, $R_1 = r_1^2$, $R_2 = r_2^2$ 分别为 M_1 、 M_2 的反射系数。

因为同一束光分成两束后,其振幅相等且为常数,假设两反射镜的反射系数相等即 $R_1 = R_2 = R$,由 (4) 式,探测器 D 输出的信号为

$$I(x) = 2KT(1 - \gamma_0)RB_0(\nu) \times [1 + \cos 2\beta(l_1 - l_2)] = I_0B_0(\nu)(1 + \cos 2\pi\nu x), \quad (5)$$

式中, $I_0 = 2KT(1 - \gamma_0)R$ 为常数, $B_0(\nu) = aa^*$,波数 $\nu = 1/\lambda$,光程差 $x = l_1 - l_2$ 。式 (5) 表明,探测器接收到的干涉信号强度是发生干涉的两相干光束间光程差的函数。

对于光波来说,干涉现象往往表现成亮暗相间的条纹,干涉现象的显著程度可用干涉现象的对比度来描述。干涉条纹的对比度 γ 定义为^[1]

$$\gamma = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m}. \quad (6)$$

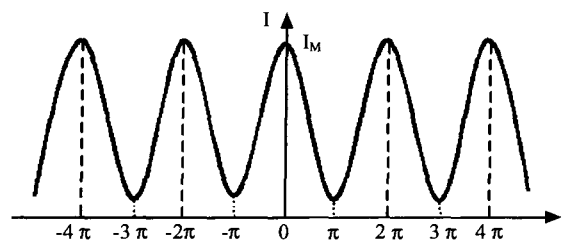


图 2 干涉条纹对比度

Fig.2 The contrast of interference stripes

其中 I_M 和 I_m 分别是干涉场中光强的极大和极小值(见图 2)。 γ 的取值范围为 $0 \leq \gamma \leq 1$ 。当 $I_m = 0$ (暗纹全黑)时, $\gamma = 1$, 条纹反差最大, 清晰可见。当 $I_M \rightarrow I_m$ 时, $\gamma \approx 0$, 条纹模糊不清, 乃至不可辨认。

3 实验结果及分析

3.1 干涉图

示波器采集的 FMI 输出的干涉信号经光电倍增管输出放大后的光电转换信号与控制 PZT 径向伸缩的驱动电压信号, 如图 3 所示。其中第 1 通道为 PMT 输出放大后的光电转换信号; 第 2 通道显示的是加在 PZT 上的驱动电压信号。

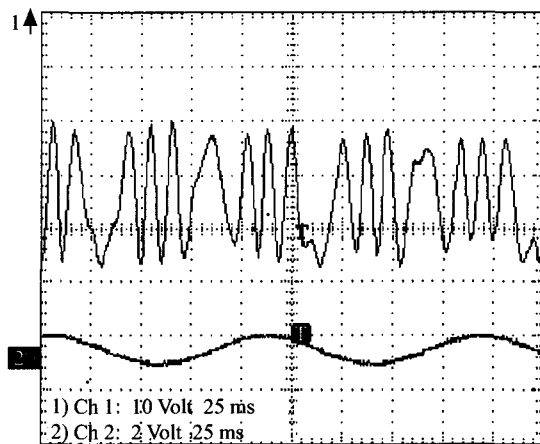


图 3 He-Ne 激光光源干涉图

Fig.3 The interferogram of He-Ne laser source

3.2 干涉条纹对比度拟合曲线

图 4 为干涉条纹对比度的拟合曲线, 由图可

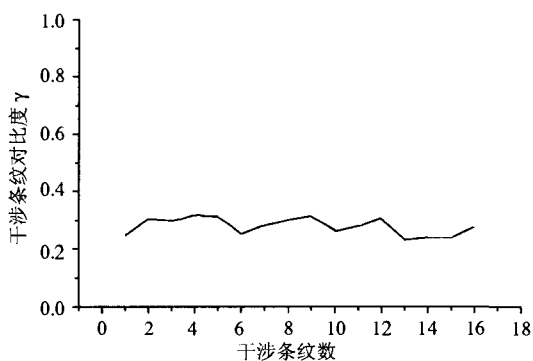


图 4 干涉条纹对比度拟合曲线

Fig.4 The fitting curve of interference stripes contrast

以看出干涉条纹的对比度值比较低, 而且在整个测量过程中起伏较为明显。

3.3 影响因素及其改进措施

由图 4 可知, 所得到的干涉图条纹对比度值较低, 整个对比度曲线起伏较为明显, 造成这些现象的主要因素有:

1) 光强度的误差^[5]

对于理想的相干点光源发出的光来说, 主要因素是振幅比。下面就此作一些说明。回到式(4), 把它用振幅表述成

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta, \quad (7)$$

当 $\delta = 2k\pi$ (k 为整数) 时, $\cos \delta = 1, I = I_M = (A_1 + A_2)^2$; 当 $\delta = (2k + 1)\pi$ (k 为整数) 时, $\cos \delta = -1, I = I_m = (A_1 - A_2)^2$ 。于是对比度为

$$\gamma = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2} = \frac{2(A_1/A_2)}{1 + (A_1/A_2)^2}. \quad (8)$$

由上式可知, 两光纤干涉臂之间光强度的误差将导致干涉条纹对比度的下降。产生两干涉臂间光强差的主要来源有: FDC 分束比不是严格意义上的 1:1 所带来的误差。因为理想情况下, 要获得最大干涉图振幅, 光纤耦合器对所研究的整个频率范围而言其平坦耦合比必须为 1:1^[6], 而在实际中要获得如此平坦的耦合比是很困难的; 传感臂光纤拉伸效应的能量损失。可以考虑在两干涉臂都加上相位调制器来拉伸光纤。另外, 如果两光纤干涉臂不等长, 对给定的波长就有一固定的相位, 从而导致仪器函数的不对称性, 这会直接影响到获得的测量干涉图的对称性^[6]; 两臂光纤端面反射镜反射率的差异, 本实验中的反射镜采用的是在光纤端面镀铝膜, 镀膜工艺所带来的两反射镜反射率带来误差。

2) 光源的影响^[8]

本实验系统中有一定量的回程光传回到激光腔中导致光源工作不稳定, 使得 He-Ne 激光器在工作过程中, 输出功率会随着时间作周期性或者随机性的波动。尽管激光器功率的变化对相位的影响不显著, 但它会引起输出条纹信噪比的变化。可以在光源与光纤之间加一光隔离器, 以消除光纤线路中的回程光对整个系统产生的影响。

另外,干涉条纹对比度与光源的单色线宽有关,且随 ΔL 的增加而降低。对于具有高斯分布的光束,在光纤干涉仪中传输得到的干涉信号可见度随由于两臂不平衡而引起的传输时间差 τ 与相干时间 τ_c 之比按指数平方规律衰减。欲使光纤干涉仪有足够高的可见度 $\gamma \geq 0.9$, τ 与 τ_c 的比值应小于等于 0.2,对于 $1.31 \mu\text{m}$ 的光源, z 在两臂差小于 10 cm 的情况下,应使谱线宽度小于等于 $0.002 \text{ nm}^{[9]}$ 。单模光纤还存在材料色散和波导色散,这些色散都会引起相位偏差,从而引起干涉条纹对比度的下降。材料色散和波导色散都是由光源的谱线宽度造成的。

3) 偏振态的影响^[4]

理想情况下的单模光纤模式是线偏振的,它的两个基模 $HE_{11}^{(x)}$ 和 $HE_{11}^{(y)}$ 是相互垂直的线偏振模。它们的传播常数相等,故彼此简并 ($n_x = n_y$),在传播过程中,保持彼此相位相同,保持线偏振态不变。实际上,一方面由于光纤本身的不完善性,例如存在横截椭圆度以及残余内应力等引起折射率分布畸变;另一方面由于外场微扰的作用,造成芯径椭圆度或纤芯折射率变化。上述这些变化因素会引起单模光纤偏振态的变化,而且单模光纤在构成光纤干涉仪的两干涉臂时,不可避免地会使光纤出现局部扭曲和弯曲应变,从而引入无规则的双折射。

此外,弯曲或扭曲导致的线性双折射也使单模光纤的两个正交偏振模之间发生无规则耦合。上述两种效应都将影响干涉仪的条纹对比度。

由低双折射光纤构成的双光束光纤干涉仪都无法避免由于光纤偏振态随机变化而引起的检测信号的随机衰落。特别是当光纤干涉仪两臂中的偏振态正交时,干涉仪的输出干涉信号为零。因此,可以考虑在光纤干涉仪的一臂中加入一个高频调制的法拉第旋转器和一个高频的 KDP 晶体^[10]。法拉第旋转器导致臂中光波的偏振态旋转, KDP 晶体则使光波的相位延迟,两者共同作用的结果使该臂的偏振态得到适当的高频调制,通过在检测电路中对调制信号滤波,可以检测到可见度稳定的低频信号。

还可以考虑进行采用保偏光纤和相应保偏光纤器件构成的干涉系统的研究。

4) 光的利用率

从光纤 Michelson 干涉仪的原理可知,经光纤定向耦合器分束和合束后的光只有 50% 最后到达光电探测器,另外的 50% 被反射回光源方向,没有被利用。可以考虑用两个光纤定向耦合器(即构成了光纤 Mach-Zehnder 干涉仪)来提高光的利用率,从而进一步提高条纹的对比度。光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的工作原理如图 5 所示。

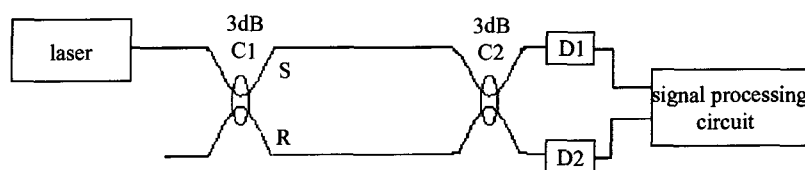


图 5 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪工作原理图

Fig.5 The diagram of optical fiber Mach-Zehnder interferometer

5) 光电探测器的影响

探测器温度随时间漂移等因素会引起探测器探测率的漂移,这使干涉仪信号强度产生起伏或漂移,从而使干涉图的直流电平和交流调制都发生漂移和起伏,也是光纤干涉仪的一个重要的噪声来源。

另外,可以通过提高整个系统的抗干扰性来改善条纹的对比度。在实验过程中经常受到多种因素

的干扰,如热干扰和电干扰(主要来源于光源和电器件)、环境干扰(主要来源于杂散光、空气的扰动及外界的震动)等等。为了防止电干扰,可以考虑将电器件与光学部分隔离组装。为了消除环境干扰,可以考虑将干涉仪全密封。

4 结论

通过实验测定了光纤 Michelson 干涉仪输出的

干涉信号, 并由此计算了干涉条纹对比度。分析得出了可能影响光纤干涉仪干涉信号对比度起伏的主要因素, 包括光强度误差、光源、光电探测器、偏振态、色散等, 并提出了相应的改进措施, 为实验中进一步提高条纹的对比度提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] Doi M, Iwasaki Y, Shionoya T, et al. High-resolution displacement measurement mode interference in the optical waveguide [J]. *IEEE Photon Technology Lett.*, 1997, **9**(5): 651-653.
- [2] Li Hong. Optical fiber sensor system of detecting gas concentration by light absorption method [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, **19**(4): 355-357(in Chinese).
李虹. 监测甲烷浓度的红外光吸收法光纤传感器 [J]. *量子电子学报*, 2002, **19**(4): 355-357.
- [3] Yu Shigang. Study on application of a novel optical fiber sensor [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, **21**(1): 64-67(in Chinese).
俞世钢. 一种新型光纤传感器的应用研究 [J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(1): 64-67.
- [4] Ming Hai, et al. *Photoelectron Technology* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1998: 235-239(in Chinese).
明海, 等. *光电子技术* [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1998: 235-239.
- [5] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 167(in Chinese).
赵凯华, 钟锡华. *光学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984: 167.
- [6] Stelzle M, et al. An all-fiber-optic Fourier transform spectrometer [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**: 1619-1630.
- [7] Zhao Peiqian, et al. Performance analyses of an infrared single-mode all-fiber-optic Fourier-transform spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(21): 4200-4209.
- [8] Li Zhigang. Data sampling of Fourier transform spectrometer interferogram using laser interference fringe [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2000, **11**(5): 503-506.
- [9] Zhao Yucheng, et al. Visibility analysis of mach-zehnder interferometer [J]. *Optical Communication Technology*, 1994, **18**(2): 91-93(in Chinese).
赵玉成, 等. Mach-Zehnder 光纤干涉仪可见度分析 [J]. *光通信技术*, 1994, **18**(2): 91-93.
- [10] Zhou Xiaodong, Tang Weizhong. Modulated polarization independent interferometric fiber-optic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(2): 236-239(in Chinese).
周效东, 汤伟中. 偏振态调制的偏振无关干涉型光纤传感器 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(2): 236-239.

作者简介: 余瑞兰 (1976-), 女, 硕士, 目前从事光纤和光电子应用方面的研究工作。