

温度和应变对光纤折射率的影响

苑立波

(哈尔滨工程大学物理部, 哈尔滨 150001)

摘要 采用迈克尔逊(Michelson)光纤白光干涉系统, 通过测量随着温度或应变改变而变化的光程, 给出了单模光纤有效折射率的温度和应变相关特性。对于 SMF-28 型单模光纤, 测得折射率温度系数和应变温度系数在波长为 1300 nm 处分别为 $0.762 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 及 $-0.1332 \times 10^{-6}/\mu\epsilon$; 在波长 1550 nm 处则为 $0.811 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 及 $-0.1649 \times 10^{-6}/\mu\epsilon$ 。并与几种不同光纤相应的数据进行了比较。

关键词 光纤, 折射率, 折射率温度系数, 折射率应变系数, 光纤干涉仪, 白光干涉。

1 引言

光纤折射率不仅是波长的函数^[1], 而且与光纤的环境温度和应力状态密切相关^[2, 3]。光纤折射率是光纤设计与制做的重要参数之一, 也是商用化光纤产品的特性参数。光纤折射率的温度相关特性和应力相关特性对于光纤光缆设计、光纤传感器设计、光纤探测仪器和光纤测试等具有重要意义。

Carr 等人用光学时域反射计(OTDR), 通过比较光脉冲在真空中和光纤中光速的方法, 给出了光纤折射率的温度系数和拉应力相关系数^[4]。本文则采用迈克尔逊光纤白光干涉系统, 在 1300 nm 和 1550 nm 两个典型波长范围内, 分别测量了 SMF-28 型单模光纤折射率随温度和应变的变化情况。

2 测量方法

2.1 折射率状态函数及其相关系数

对于光纤折射率而言, 通常视为一不变常数。然而事实上, 光纤折射率 n 不仅是波长 λ 的函数, 而且还随环境温度 T 及所处的应变状态 ϵ 而变化。因而, 光纤折射率可一般地用一个状态函数 $n(\lambda, T, \epsilon)$ 来描述。若把零应力状态某一固定波长和恒定温度下的折射率记为 $n(\lambda, T_0)$ 。由于折射率变化通常很小, 因而一般地可在该值附近展开为

$$n(\lambda, T, \epsilon) = n(\lambda, T_0) + \frac{\partial n}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial n}{\partial \epsilon}\epsilon \quad (1)$$

记 $C_T = [1/n(\lambda, T_0)](\partial n/\partial T)$, $C_\epsilon = [1/n(\lambda, T_0)](\partial n/\partial \epsilon)$ 分别为光纤折射率的温度系数和应变系数。于是(1)式可写成

$$n(\lambda, T, \epsilon) = n(\lambda, T_0) [1 + C_T(T - T_0) + C_\epsilon \epsilon] \quad (2)$$

本文将用实验的方法来确定相关系数 C_T 及 C_ϵ 。

2.2 光程比较测量法

为了对上述参数进行测量，采用图 1 所示的迈克尔逊光纤干涉仪，通过光程比较的方法来间接地测量折射率随相关状态的变化特性。

来自宽带光发射二极管的光被 3 dB 单模光纤耦合器分成两束，经过测量光纤臂及参考光纤臂后，被测量光纤反射端面及参考光纤反射扫描镜分别反射回来，由探测器接收干涉信号，形成迈克尔逊光纤干涉仪。当两臂的光程差小于光源的相干长度时，就会产生如图 2 所示的白光干涉图，其具有振幅极大的中心干涉条纹对应于两臂光程绝对相等处。利用这一干涉特性，当被测光纤纤芯折射率发生变化时，将导致光程差发生变化。于是可移动参考比较臂的反射扫描镜，来找到变化后的新的平衡点。通过测量反射扫描镜变化前后的位移即可测得相应光纤折射率的变化。

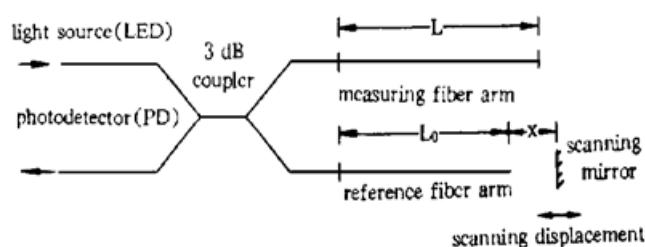


Fig. 1 Fiber optic Michelson white light interferometer measuring system

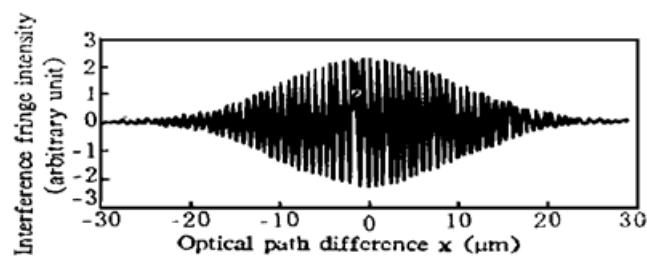


Fig. 2 Output signal pattern of fiber optic white light interferometer illuminated by a LED source

2.3 折射率温度系数的确定

设零应力状态下光纤长度为 L 的测量臂置于环境温度为 T 的测量室中，如图 3 所示。参考比较臂的长度为 L_0 ，其环境温度为 T_0 保持恒定不变。

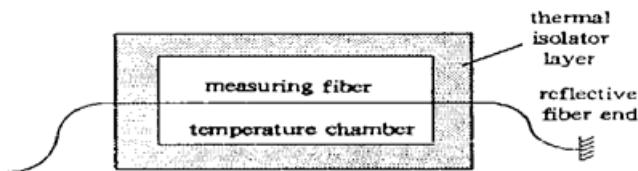


Fig. 3 Temperature chamber using for fiber optic refractive index temperature coefficient test

在温度为 T_0 时，测量光程与参考光程的平衡方程为

$$L(T_0)n(\lambda, T_0) = L_0(T_0)n(\lambda, T_0) + x \quad (3)$$

式中 $L(T_0)$ 为 T_0 温度下测量光纤臂的长度， $L_0(T_0)$ 为参考比较光纤臂的长度。 x 为参考比较光纤臂端点到扫描反射镜之间的距离。

当测量光纤温度上升为 T 时，由于光纤的线性热膨胀及折射率的改变将导致光纤光程发生变化。于是新的光程平衡方程为

$$L(T_0)[1 + \alpha_T(T - T_0)]n(\lambda, T_0)[1 + C_T(T - T_0)] = L_0(T_0)n(\lambda, T_0) + x + \Delta x \quad (4)$$

式中 $\alpha_T = 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 为光纤的线性热膨胀系数。 Δx 为扫描反射镜的位移。略去高阶小项，有

$$\Delta x = L(T_0)n(\lambda, T_0)[\alpha_T + C_T](T - T_0) \quad (5)$$

故

$$C_T = \frac{\Delta x}{L(T_0)n(\lambda, T_0)(T - T_0)} - \alpha_T \quad (6)$$

2.4 折射率应变系数的确定

为了测量光纤折射率在不同应力状态下的变化情况，将长度为 L 的待测光纤剥去包层后，将其用环氧均匀地粘贴在如图4所示的板状金属拉伸试件中部。在光纤附近粘贴一电阻应变片，以监测并记录应变状态。在测量过程中，实验系统的环境温度保持不变。

在试件拉伸过程中，随着应力的变化，光程变化由下式给出

$$\Delta x = n(\lambda, T_0) \Delta L(\epsilon) + \Delta n(\epsilon) L = n(\lambda, T_0) L [1 + C_\epsilon] \epsilon \quad (7)$$

式中 $\Delta L(\epsilon) = L\epsilon$, $\Delta n(\epsilon) = n(\lambda, T_0) C_\epsilon \epsilon$ 分别为光纤长度及折射率随应力变化而产生的增量。于是光纤折射率应变系数可测得为

$$C_\epsilon = \frac{\Delta x}{n(\lambda, T_0) L \epsilon} - 1 \quad (8)$$

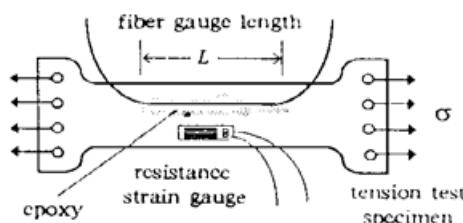


Fig. 4 Arrangement of fiber optic strain coefficient testing specimen

3 测量结果

3.1 测试系统

光纤折射率温度和应变系数的测量系统如图5所示。分别采用了中心波长为1300 nm和1550 nm的光发射二极管作为宽带低相干光源，驱动电流分别为50 mA和60 mA。当进行温

度系数测量时，迈克尔逊光纤干涉仪的测量臂被置于温度可调节的恒温室中，温度控制精度为0.1 °C。当进行应变系数测量时，测量臂则被固定于应力加载系统的平板拉伸试件上。应变仪指示精度为1 με。该测量光纤臂端面镀以反射膜形成反射端。光纤干涉仪的参考臂与棒状自聚焦准直透镜(GRIN lens)相连，在线性步进电机驱动的平台上，置一反射镜，与棒状透镜相互垂直。经测量臂的反射端面和参考臂

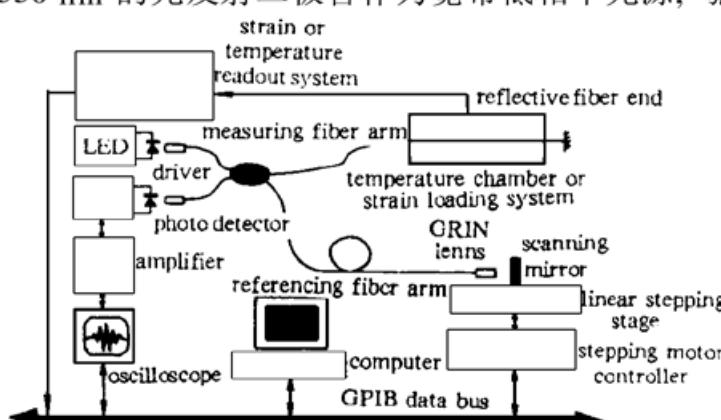


Fig. 5 Testing experimental system

的反射镜反射回来的光信号通过3 dB耦合器后，一同馈至光电探测器，经放大后由PC机通过GPIB数据总线进行数据采集。用示波器来监测扫描过程的波形情况。该系统的测试精度取决于反射扫描镜的位移精度以及白光干涉中心条纹的分辨精度。本系统的步进电机驱动平台步长为1 μm，精度高于0.5 μm。而白光干涉中心条纹的分辨精度一般被估计为中心波长的一半($\lambda_0/2$)^[5]，对于1.3 μm的光发射二极管为0.65 μm，对于1.55 μm波长的光发射二极管则为0.77 μm。

3.2 实验测量结果

图6给出了在室温为25°C情况下，SMF-28型单模通信光纤在1300 nm和1550 nm工作波长下扫描反射镜位移随温度的测量曲线。测试光纤长度为 $L = 876$ mm，光纤芯径及包层直径为9 μm/125 μm，SMF-28型单模通信光纤在25°C环境温度下其纤芯折射率对1300 nm波长为1.4675，对于1550 nm波长为1.4681。测试温度变化范围为38°C~80°C，在此温区

内, 测得折射率温度系数为 $C_T = 0.762 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (1300 nm) 及 $C_T = 0.811 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (1550 nm)。图 7 为光纤折射率随温度变化情况。

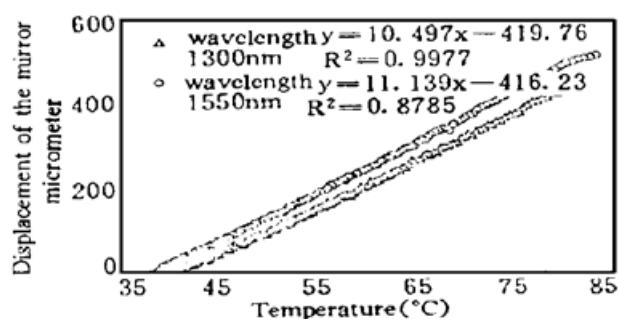


Fig. 6 Displacement of scanning mirror vs. temperature with the measuring fiber length 876 mm

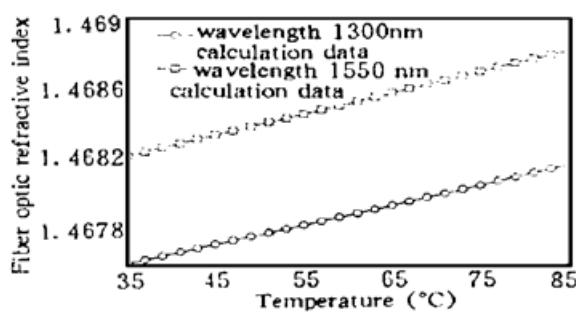


Fig. 7 Fiber optic refractive index vs. temperature T

扫描反射镜位移随应变状态而变化情况如图 8 所示。测试环境温度为 25 °C, 测量光纤长度为 150 mm, 在 0~1200 $\mu\epsilon$ 范围内的折射率应变系数为 $C_\epsilon = -0.1332 \times 10^{-6} / \mu\epsilon$ (1300 nm 波长) 及 $C_\epsilon = -0.1649 \times 10^{-6} / \mu\epsilon$ (1550 nm 波长)。图 9 给出了光纤折射率随应变状态变化的情况。

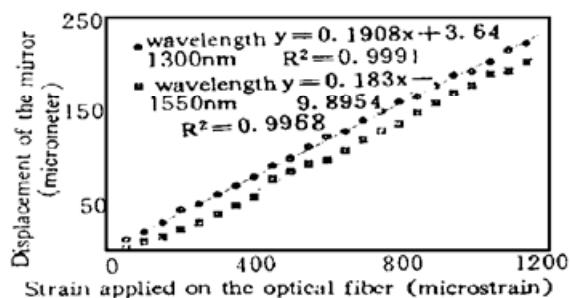


Fig. 8 Displacement of scanning mirror vs. strain applied on the optical fiber with length 150 mm

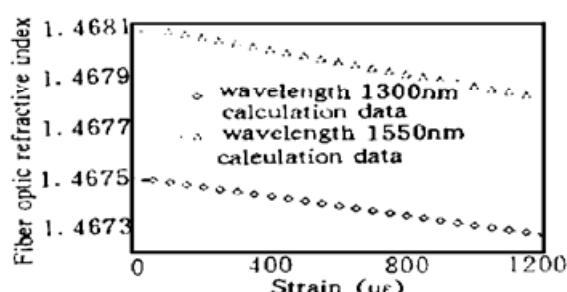


Fig. 9 Fiber optic refractive index vs. strain

表 1 给出了本文的测试结果与文献[3, 4, 6]的对比情况。由此可以看出所测得的参数较文献[3, 4, 6]所给出的要小, 这种不一致性可能与所用被测光纤纤芯的折射率分布结构及元素掺杂情况有关。文献[4]所用的光纤为 Δ 型色散位移光纤。文献[3]所用光纤为 $\text{P}_2\text{O}_5/\text{GeO}_2$ 掺杂多模光纤, 而文献[6]所用光纤则为 B_2O_3 掺杂单模光纤。

Table 1. Fiber-optic refractive index temperature and strain coefficient testing results

coefficients	this paper	J. J. Carr's [4]	A. H. Hartog's [3]	L. G. Cohen's [6]
$C_T (1/^\circ\text{C})$ (1300 nm)	0.762×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
$C_T (1/^\circ\text{C})$ (1550 nm)	0.811×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
$C_\epsilon (1/\mu\epsilon)$ (1300 nm)	-0.1332×10^{-6}	-0.25×10^{-6}	-0.36×10^{-6}	—
$C_\epsilon (1/\mu\epsilon)$ (1550 nm)	-0.1649×10^{-6}	-0.25×10^{-6}	-0.36×10^{-6}	—

结语 光学干涉方法是精密测量常用的方法之一。本文给出了一种利用白光干涉光纤迈克尔逊干涉仪测量光纤折射率的温度系数和应变系数的方法。并测量了 SMF-28 型单模通信光纤在 1300 nm 和 1550 nm 处的光纤折射率相关系数。与 Carr 等人所采用的光学时域反射计方法相比, 这种方法不需要较长的测试光纤(仅用 1 m 长左右的光纤)。在光学时域反射计方

法中，测试光纤长度依赖于光学时域反射计的时间分辨率，因而如果测试光纤较短将带来较大的误差(Carr 等人所用测试光纤长度为 50 m)。比较了几种不同的光纤在 1300 nm 和 1550 nm 两个波长下的测试结果，所获得的光纤折射率温度系数和应变系数差别较大。这表明光纤折射率温度系数和应变系数对光纤的折射率剖面结构和纤芯元素的掺杂情况有较强的依赖性。

参 考 文 献

- [1] I. H. Malitson, Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(10) : 1205~ 1209
- [2] H. Mueller, The theory of photoelasticity. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1938, **21**(1) : 27~ 33
- [3] A. H. Hartog, A. J. Conduit, D. N. Payne, Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibers. *Opt. and Quantum Elect.*, 1979, **11**(3) : 265~ 273
- [4] J. J. Carr, S. L. Saikonen, D. H. Williams, Refractive index measurements on single-mode fiber as functions of product parameters, tensile stress, and temperature. *Fiber and Intergrated Optics*, 1990, **9**(4) : 393~ 396
- [5] Tianchun Li, Anbo Wang, K. Murphy *et al.*, White-light scanning fiber Michelson interferometer for absolute position-distance measurement. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7) : 785~ 787
- [6] L. G. Cohen, J. W. Fleming, Effect of temperature on transmission in lightguides. *Bell Syst. Tech.*, 1979, **58**(8) : 945~ 951

Effect of Temperature and Strain on Fiber Optic Refractive Index

Yuan Libo

(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(Received 11 January 1997)

Abstract By using white light fiber optic Michelson interferometer, the temperature and strain coefficients of fiber optic refractive index were determined via the measurements of optical path changing as a function of temperature or strain. The results show that the temperature and strain coefficients of fiber optic refractive index were $0.762 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ and $-0.1332 \times 10^{-6}/\mu\epsilon$ for 1300 nm wavelength and $0.811 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ and $-0.1649 \times 10^{-6}/\mu\epsilon$ for 1550 nm for the type SMF-28 single mode communication optical fiber, respectively. The measured results were compared with published data.

Key words fiber optic, refractive index, temperature coefficient, strain coefficient, fiber optic interferometer, white light interferometer.