

光导纤维传输特性的测量

毛 镇 道
(上海市测试技术研究所)

一、引 言

作为传输信息的光导纤维,其传输性能主要由它的损耗和带宽所决定。有关光纤的许多测量工作主要也是围绕这两方面进行的。M. K. Barnoski 等人^[1]对光纤的测量已作了很好的评述,本文着重介绍近期的报道。

光纤损耗主要来自: 1. 材料的本征吸收和杂质离子(尤其是过渡金属和 OH⁻ 离子)的吸收; 2. 光纤中折射率不均匀,微小气泡、晶粒和杂质引起的瑞利散射和米氏散射; 3. 由渐变型光纤芯部折射率剖面的中心沿芯轴的起伏和纤芯-包层界面上的缺陷引起的波导散射; 4. 光纤成缆后,由光纤的微小弯曲所造成的弯曲损耗。当光强足够强时,还要考虑受激喇曼散射和受激布里渊散射。此外,对军事和航天应用,还要考虑由外界辐射所感生的吸收。近年来,由于技术的进步,光纤损耗几乎已降到材料本征损耗的极限(在 1.27 μm 附近约为 0.5dB/km),有关光纤的测量工作较多地集中在传输带宽方面。

多模光纤的带宽主要受材料色散、模间延迟和纤芯折射率剖面色散的限制。材料色散与材料的性质和掺杂元素有关。模间延迟取决于纤芯折射率剖面的形状。折射率剖面色散是指折射率剖面的形状随波长的改变而异。

材料色散和波导色散限制了单模光纤的带宽。由于材料色散随波长的增加而降低,故可在长波区域制备材料色散极低的光纤。1975 年

已在 1.3 μm 附近找到了材料色散为零的光纤材料。D. Gloge 曾预言^[2],单模光纤的色散几乎为材料色散所独占,波导色散可忽略不计。但由于材料色散在长波区域趋于零,测量的结果表明^[3],在长波区域单模光纤的波导色散会超过材料色散。

二、损 耗 测 量

测量损耗的方法很多,主要有插入损耗法^[4]和后向散射法^[5]。后者又称为光学时域反射仪,简称 OTDR。

先介绍插入损耗法。当波长为 λ , 光强为 $I(0, \lambda)$ 的人射光束在光纤中经过一段距离的传输以后,强度衰减为

$$I(z, \lambda) = I(0, \lambda) \exp[-\alpha(\lambda)z], \quad (1)$$

式中 α 为损耗系数, z 为入射光束在光纤中传输的距离。对两个不同长度 z_1 和 z_2 的光纤分别测量透射的光强 $I(z_1, \lambda)$ 和 $I(z_2, \lambda)$, 则

$$\alpha(\lambda) = \ln [I(z_1, \lambda)/I(z_2, \lambda)] / (z_2 - z_1). \quad (2)$$

若采用 dB/km 作单位,损耗系数

$$\alpha(\lambda) = 10 \log [I(z_1, \lambda)/I(z_2, \lambda)] / (z_2 - z_1), \quad (3)$$

式中 z 用公里作单位。

这种方法一般采用卤素灯和单色仪作为可调波长的光源,以一定的波长间隔(如 10nm)对不同长度的光纤测量透射光强。由于光纤的损耗与光纤中传播的模分布有关,在测量时必须激发光纤中全部可能的传播模,以保证恒定的人射条件。较常用的方法是使人射光束经过一

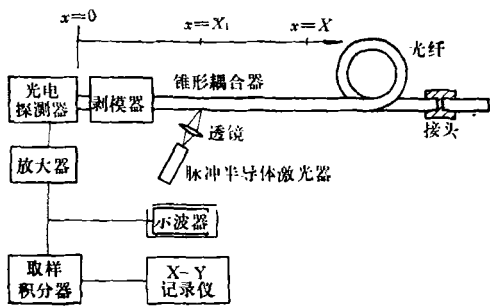


图1 OTDR法测量装置

搅模器以后再注入光纤。另外,为了避免包层模对测量的影响,通常在光纤的输入端和输出端加上剥模器。较简便的剥模器是一只充满甘油的小池。

OTDR 法是利用注入光纤的光束在光纤中传播时的后向散射作为探测信号,测定光纤损耗与光纤长度的关系。测量装置如图1所示。一个砷化镓激光器发射的激光通过一锥形耦合器(或分束器)进入光纤,一个光电探测器接收后向散射的光脉冲。该探测器收到的光功率

$$P_d(X) = kSP(X_1) \exp[-2\bar{\alpha}(X, X_1) \times (X - X_1)], \quad (4)$$

式中

$$\bar{\alpha}(X, X_1) = \frac{1}{2(X - X_1)} \times \int_0^{X-X_1} [\alpha'(x) + \alpha''(x)] dx, \quad (5)$$

其中 k 为与锥形耦合器和图中左边一小段光纤的损耗有关的常数; S 为在 X_1 处的后向散射系数; $P(X_1)$ 为在 X_1 处的前向光功率; $\alpha'(x)$ 为前向损耗系数; $\alpha''(x)$ 为后向散射的损耗系数。

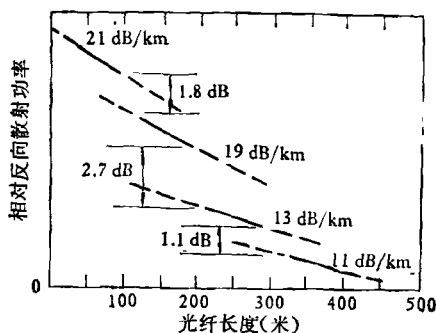


图2 OTDR法测量结果

这个脉冲信号被接收、放大后,输入到一个取样积分器(boxcar)中,积分器的输出驱动一函数记录仪以显示光纤损耗与长度的关系。

M. K. Barnoski 等人将 OTDR 法的测量结果与插入损耗法作了比较,一致性在实验误差范围之内。为了显示这种方法的优点,他们将四根不同型号的一百米长的光纤用三个接头连起来,在记录仪上一次测出这四根光纤和三个接头的损耗(见图2)。

近来, L. Wilson 等人报道了光纤光谱损耗测量的自动测量系统^[6]。该系统采用插入损耗法,光谱范围是 $0.63-1.51 \mu\text{m}$, 测量损耗的范围是 33 dB, 相对精度为 $\pm 0.2 \text{ dB}$ 。

三、传输带宽的测量

在多模光纤中,由于不同的模按不同的路程传播,一个光脉冲经过一段距离的传输之后就产生模间延迟,宽度变宽,幅度下降。时域上的变宽相应于频域上的变窄,光纤就相当于一个有限带宽的滤波器,即随着调制频率的增加,从光纤出射的信号幅度逐渐下降。信号幅度下降 3 dB 时的频率值定义为光纤的传输带宽。

对于传输信息的光纤,可以看作是一个时间不变系统,其输出功率函数与输入功率函数之间存在下述关系:

$$p_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\text{in}}(\tau) g(t - \tau) d\tau, \quad (6)$$

若写成卷积形式,则为

$$p_{\text{out}} = p_{\text{in}}(t) * g(t), \quad (7)$$

式中 $g(t)$ 即为系统的脉冲响应, $*$ 为卷积符号。对于频域中的输出和输入 $P_{\text{out}}(\omega)$ 和 $P_{\text{in}}(\omega)$, 则存在简单的关系:

$$P_{\text{out}}(\omega) = G(\omega)P_{\text{in}}(\omega), \quad (8)$$

其中 $G(\omega)$ 是脉冲响应 $g(t)$ 的傅里叶变换,即

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \exp(-2\pi i \omega \tau) d\tau, \quad (9)$$

而 $P_{\text{out}}(\omega)$ 和 $P_{\text{in}}(\omega)$ 分别是 $p_{\text{out}}(t)$ 和 $p_{\text{in}}(t)$ 的傅里叶变换。 $G(\omega)$ 称为系统的传递函数(也称基带响应),它表示系统在频域中的特性。

不难看出,传输带宽既可在时域中测量,也可在频域中测量.若在时域中测量,就要通过冗繁的倒卷积运算由(6)式得到脉冲响应 $g(t)$,再通过傅里叶变换得到基带响应 $G(\omega)$.在频域中,则由(8)式直接可得 $G(\omega)$.

本文只对频域法作简单介绍,对时域法感兴趣的读者可参阅文献[7].

L. G. Cohen 等人^[8]以频域法测量了多模光纤的频率响应与波长的关系.测量系统如图3所示.由氙弧灯发出的白光通过窄带干涉滤光片后由带宽为0—1 GHz的钽酸锂电光调制器调制,同步移动两块可动镜,将调制光束注入待测光纤或参考光纤.光电倍增管接收由光纤输出的信号,在一频谱分析仪上显示.测试光纤与参考光纤的测量数值之比(消除了系统误差)即为实际的传输带宽.

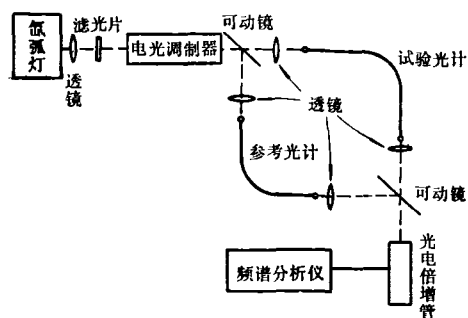


图3 频域法测光纤传输带宽与波长的关系

这个方法可得到传输带宽与波长的关系,从而可对材料色散对多模光纤传输带宽的影响作出估计,为选择最佳工作波长提供依据.

四、材料色散

对于单位长度的单模光纤,当略去波导色散时,由 D. Gloge 的理论^[2]可以导出由材料色散所引起的时间延迟

$$\tau_m = \frac{1}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right), \quad (10)$$

式中 λ , c 和 n 分别表示波长、光速和折射率.材料色散定义为

$$M = - \frac{d\tau_m}{d\lambda} = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}. \quad (11)$$

L. G. Cohen 和 C. L. Lin^[9]用一锁模加Q开关的掺铈钕铝石榴石激光器产生的波长为1.06 μm 、脉宽为0.2 ns的高功率激光脉冲来激励一根170米长的掺硼石英光纤,以产生受激喇曼辐射.受激喇曼辐射共产生六条斯托克斯谱线,它们分别是 $\lambda=1120, 1180, 1240, 1310, 1410$ 和 1510 nm .由于自相位调制,使每条斯托克斯线加宽,形成一准连续的带.由光纤喇曼发生器输出的脉冲光束经单色器分光后注入试验光纤,同时还分出一束作参考光束.参考光脉冲与经过试验光纤后被加宽的光脉冲一起进入锗探测器,由快响应示波器显示,以测定在不同波长下的时间延迟,即 $\tau_m-\lambda$ 曲线.再由(11)式算出材料色散 M .测量精度为2 ps/km·nm.近来,他们又将这套技术应用于光纤损耗谱的测量^[10].

K. Daikoku 和 A. Sugimura^[3]用在取样示波器上观察里萨朱图形测量相移的方法测量时间延迟 $\Delta\tau$,并以差分表示 $\Delta\tau/\Delta\lambda$ 代替微分表示 $d\tau/d\lambda$ 求得材料色散 M .所用的光源是由Nd:yAG激光器泵浦的温度调谐的铈酸锂参量振荡器.它在0.56—3.5 μm 波长范围内提供每秒75个脉宽大于100 ns、谱宽小于0.1 nm的激光脉冲.这些激光脉冲再由一钛扩散的铈酸锂光学波导以正弦基带信号进行调制.调制器的半波电压和3 dB处的带宽分别是3.8 V和850 MHz.接收器是锗雪崩二极管,并以一很窄的带通滤波器降低雪崩二极管的噪声.一空气移相器用来定标相移.实验结果和理论计算表明,在大于1.15 μm 的长波区域,波导色散超过材料色散而成为主要的色散因素.

对数据处理比较严密,对设备要求又不过高的测量方法是由 D. N. Payne 等人提出的^[11].由于波长和折射率的关系可用塞耳梅尔方程作准确的描述,他们把(10)式也写成塞耳梅尔的形式

$$\tau_m = a + b\lambda^{-2} + c\lambda^{-4} + d\lambda^2 + e\lambda^4. \quad (12)$$

从实验上测出 τ_m 与 λ 的关系,用最小二乘方的

方法定出(12)式中的各个系数,从而得到 τ_m 与 λ 的函数关系,再由(11)式计算 M 。由此测得的 M 的精度优于 $0.05 \text{ ps/km} \cdot \text{nm}$, M 为零值时波长测量的准确度为 1 nm 。

他们的实验装置中采用一个由染料激光器泵浦的、温度调谐的铌酸锂参量振荡器作光源。光源在 $0.78\text{--}2.6 \mu\text{m}$ 波长范围内可连续调谐,每秒输出10个脉冲,并用普克尔盒将脉冲压缩到 0.5 ns 。用一数字延迟发生器和一台示波器测量信号通过光纤后的脉冲延迟。延迟发生器在示波器上提供在光纤中产生的脉冲延迟,从而使得渡越时间的主要部分为延迟发生器所抵消,就可以高精度地由示波器读出小的变化。

五、折射率剖面和剖面色散的测量

如前所述,多模光纤的传输带宽受材料色散,模间延迟和纤芯折射率剖面色散的限制。对于模间延迟,可以通过纤芯截面上一定形状的折射率分布进行补偿。这种一定形状的折射率分布通常称为折射率剖面。由于不同的波长有不同的折射率剖面,故知道折射率剖面色散的情况以后,就可以选择合适的波长以获得最佳的补偿。

光纤折射率剖面的常用数学表式是^[12]

$$n(r) = n(0)[1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2}, \quad (13)$$

$$0 \leq r \leq a,$$

式中 r 是到芯心的距离, a 是芯半径, $\Delta = 1 - n(a)/n(0)$ 。显然,满足(13)式的折射率剖面由参数 α 和 Δ 表征, α 决定剖面形状(称形状参数), Δ 与数值孔径有关。根据R. Olshansky等人的结果^[13], α 的最佳值

$$\alpha_{\text{opt}} = 2 - 2P - 12\Delta/5, \quad (14)$$

其中

$$P = \frac{n(0)}{N_0} \cdot \frac{\lambda}{\Delta} \cdot \frac{d\Delta}{d\lambda} \quad (15)$$

称为剖面色散参数,它表征剖面形状随波长的改变而产生的变化,而

$$N_0 = n(0) - \lambda \frac{dn(0)}{d\lambda} \quad (16)$$

是材料的群折射率。

测量纤芯折射率剖面的方法很多,有干涉法、近场花样法、反射法、散射法和空间滤波法等,其中以H. M. Presby和D. Marcuse等人建立并发展的干涉法^[14,15]的精度最高。

该法的基本思想是测量纤芯截面上因折射率差异而引起的干涉条纹的位移,并使测量精度达千分之一条纹,从而保证 $\Delta n(r)$ 的测量精度达到 10^{-5} 。由式(13)~(16)不难看出,该法可测 $\Delta, P, \alpha, n(r)$ 和 $dn(r)/d\lambda$ 等。由 $dn/d\lambda$ 与 λ 的关系还可算出单模光纤的材料色散 M 。

为了避免干涉法中费时费工的样品制备,达到快速测量的目的,D. Marcuse又创立了聚焦法^[16]。利用聚焦法,只需用普通显微镜就可测量整段光纤的折射率剖面^[17],若以简单的光学系统代替显微镜,又可测量预制坯棒的折射率剖面^[18]。

紧接着,D. Marcuse和H. M. Presby等人又根据光纤折射率剖面的形状计算了传输带宽^[19],调查了折射率剖面的形变对传输带宽的影响^[20]。由此,根据预制坯棒的折射率剖面即可估算出光纤的传输带宽,从而作出质量评定。

光纤传输特性测量技术近年来尽管有了很大的进展,但大量事实表明,对上述多参数的测量几乎普遍存在用不同的测量方法所得结果很不一致的问题。要解决这一问题,一方面有待于理论工作和实验工作的进一步发展,同时也极需逐步建立为各界所确认的、合理的测试规范,以期获得一致的测量结果。

参 考 文 献

- [1] M. K. Barnoski et al., *Proc. IEEE*, **66**(1978), 429.
- [2] D. Gloge, *Appl. Opt.*, **10**(1971), 2442.
- [3] K. Daikoku et al., *Electron. Lett.*, **14**(1978), 149.
- [4] D. B. Keck et al., *Appl. Opt.*, **11**(1972), 1502.
- [5] M. K. Barnoski et al., *Appl. Opt.*, **16**(1977), 2375.
- [6] L. Wilson et al., *Opt. Laser Tech.*, **10**(1978), 197.
- [7] J. W. Dannwolf et al., *IEEE Trans Instrum. Meas.*, **25**(1976), 401.
- [8] L. G. Cohen et al., *B. S. T. J.* **55**(1976), 1509.
- [9] L. G. Cohen et al., *Appl. Opt.*, **16**(1977), 3136.

- [10] L. G. Cohen et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, 14(1978), 855.
 [11] D. N. Payne et al., *Electron. Lett.*, 13(1977), 628.
 [12] D. Gloge et al., *B. S. T. J.* 52(1973), 1563
 [13] R. Olshansky et al., *Appl. Opt.*, 15(1976), 483.
 [14] H. M. Presby et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 49(1978), 339.
 [15] H. M. Presby et al., *Appl. Opt.*, 17(1978), 2209
 [16] D. Marcuse. *Appl. Opt.*, 18(1979) 9
 [17] L. M. Boggs et al., *B. S. T. J.*, 58(1979), 867.
 [18] H. M. Presby et al., *Appl. Opt.*, 18(1979), 671
 [19] H. M. Presby et al., *Appl. Opt.*, 18(1979) 3249
 [20] D. Marcuse et al., *Appl. Opt.*, 18(1979), 3758

精密扭摆

——观察引力异常的一种仪器

吴永生 张平华 刘易成
 (中国科学院物理研究所)

一、引言

1970年3月7日美国萨克斯耳和艾伦在哈佛塔内利用扭摆作了一次日食观察^[1]，他们发现扭摆的周期在初亏到食甚期间发生了显著变化——相当于在23公斤的摆盘上加了1.2公斤的重物，即增加了5%，这比按经典引力理论计算得出的数值约大十万倍。法国艾来斯在1954年6月30日用锥摆做了一次日食观察，他发现锥摆的摆动平面在初亏到食甚期间也出现异乎寻常的弹跳^[2]。他们都认为要解释这种现象必须重新考虑经典的引力理论。1979年9月6日在北京的月食期间我们也用扭摆作了一次观察，其现象与萨克斯耳等人在1960年3月13日的月食期间所观察到的现象是很相似的^[3]。当然，要对这种“异常”现象作出肯定的结论和解释，还须作更多的观察，积累更多的实验资料才行。

1980年2月16日在我国云南省有一次日全食，我们用扭摆等仪器又作了一次观察，其结果将在以后公布。

二、扭摆的结构

扭摆基本上是由扭摆、伺服系统和自动记

录系统三部分组成。图1是扭摆的示意图。扭丝6是一根恒弹性钢丝，长约1.6米，直径1.5毫米，由北京冶金研究所提供。该丝经校直、磨光和真空热处理，以得到恒弹性和高的机械性能。测得的杨氏模量 $E = 1.85 \times 10^4$ 公斤/毫米²，剪弹性模量 $G = 7.00 \times 10^3$ 公斤/毫米²，频率温度稳定系数 $g_E = 2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。扭丝的上下两端分别用黄铜扭丝夹2'，2'和扭丝压块

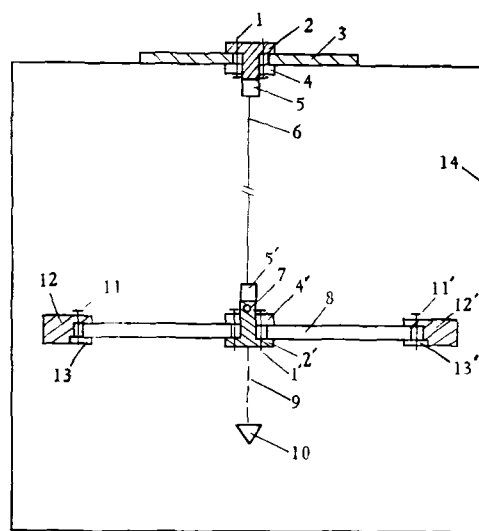


图1 扭摆的示意图

- 1, 1'——螺钉； 2, 2'——扭丝夹； 3——支撑板；
 4, 4'——压盘； 5, 5'——扭丝压块； 6——扭丝；
 7——反射镜； 8——玻璃转盘； 9——细棉线；
 10——附加重物； 11, 11'——螺钉； 12, 12'——
 衔铁； 13, 13'——衔铁固定片； 14——扭摆架