

光纤与光器件的 测量理论与实验

(上)



电子工业部第二十三研究所情报室译

前 言

本书是为那些对光通信有兴趣的研究生、研究员和设计师编写的。若要对特定论题进行更详尽的研究，除了参考本书外，还要参考其它几本书。尽管如此，本书仍可看作一部完整的教材。纤维光学中的测量需要多方面的经验，而这些经验往往是属于不同专业领域的，如传统光学、光谱测量技术、干涉测量技术、模拟和数字电子设备、力学等等，但是我们尽力去论述各种实验装置的主要原理。在论述中仅回顾了几个基本概念。

前两章中的几种分析方法要使人们了解一些有时在实验研究中用得到的近似计算方法。本书不一定要读者按编排好的论题顺序去阅读。书中对各类实验测试分别进行论述。当然，其中一些测试有很多共同点。对这些共同点，书中仔细地作了重点说明。

为光纤的测试确定严谨的标准是很困难的，因为连一些国际性的委员会如今还在进行标准化方面的工作。然而，目前提出一些对许多实际场合有用的方法论，这是有可能办到的。人们必须考虑一个非常重要的问题，那就是给定的电缆或器件必须在某个传输系统中工作。从这个意义上来说，相同的实验研究可能会有很大差异。差异的大小要看被测对象以及该对象的预期功能如何而定。例如，光纤的衰减测量需要很高的精度，尤其在被测光纤的损耗很低时更是如此。但是因为使用不同的光源会产生不同的结果，这些结果的差异又明显大于实验的不确定性，所以必须花很大的精力去考虑该光纤所在的系统须采用哪一种光源。

我们要感谢马可尼公司的董事长G·C·可拉泽先生对我们纤维光学实验室研究工作的推动。本书的许多内容正是在这一研究工作中孕育而成的。我们还要深深感谢C·G·苏梅达先生对我们工作的不断鼓励、建议和富有经验的支持，感谢M·梅泽提先生和P·方铁尼先生在我们取得本书所述的某些理论结果及实验结果时给予的合作，也要感谢G·法西赛卡先生，V·利佐里先生，P·巴西先生和M·佐波力先生参加审议，给予帮助。

手稿中所用的符号

- $\overline{A}$ 矢量。从物理学角度来看，表示具有一个以上标量的参数。
 $\overline{A}$ 也是复相量。
- $\underline{A}$ 具有一行列或多行列的矩阵。从数学角度来看，表示标量变量的集合。
- $\hat{A}$ 单位矢量和微分算子。
- $\cdot$ 矢量的点积。
- $\times$ 矢量的矢量积。

目 录

第一章	理想多模光纤中光的传播	1
1.1	电磁模型的概述	1
1.1.1	一般考虑	2
1.1.2	圆阶跃型光纤的精确的电磁理论	5
1.1.3	导模总数的近似评价	7
1.1.4	渐变型光纤的 W K B 近似解	9
1.2	几何光学模型	11
1.2.1	阶跃型光纤中的光接收角	12
1.2.2	模式和光线间的对应关系	15
1.2.3	渐变型光纤中的光接收角	17
1.2.4	不均匀媒质中的普通几何光学	19
1.2.5	运动恒量	22
1.2.6	光线跟踪	25
1.2.7	光线域	28
1.2.8	辐射定律	30
1.2.9	光线分布	32
1.2.10	域 (r, θ)	34
1.3	模间色散	38
1.3.1	阶跃型光纤中的时间色散	38
1.3.2	α 分布	42
1.3.3	α 分布的 W K B 近似	45
1.3.4	漏泄模的影响	51
1.3.5	α 分布测量用的几何光学法	52
1.3.6	均方根脉冲	58
1.3.7	注入条件的简化描述	61
1.3.8	注入条件的影响	63
1.3.9	不理想分布的影响	65
1.3.10	光纤链路中时间色散的补偿效果	71

1.4	模间时间色散	72
1.4.1	材料色散存在时的群延时	72
1.4.2	光源谱宽有限扩展的影响	74
1.4.3	零材料色散波长	76
1.4.4	总时间色散	77
1.4.5	材料色散存在时的最佳折射率分布	79
1.4.6	线性折射率分布的色散	82
1.4.7	非线性折射率分布的色散	84
第二章	实际光纤	86
2.1	固有衰减	86
2.1.1	固有衰减的起因	87
2.1.2	吸收损耗	89
2.1.3	散射损耗	92
2.2	光纤微扰	94
2.2.1	光纤微扰的种类	95
2.2.2	研究光纤微扰的电磁法概述	97
2.2.3	研究纤芯直径波动的几何光学法	98
2.2.4	研究微弯的几何光学法	104
2.2.5	电磁模型中的光功率流方程	111
2.2.6	几何光学模型中的光功率流方程	115
2.2.7	光功率流方程的解	118
2.2.8	与时间有关的方程	121
2.3	微扰光纤的传输特性	122
2.3.1	与时间无关的方程的精确解	122
2.3.2	与时间有关的方程的微扰解	127
2.3.3	达到稳态时衰减系数的演变情况	131
2.3.4	达到稳态时基带响应的演变情况	133
2.3.5	成缆工艺的最佳化	137
2.4	接头的影响	140
· II ·		

2.4.1	固定接头和连接器	140
2.4.2	连接器的精确电磁模型	142
2.4.3	连接器的线性模型	145
2.4.4	研究串接光纤的矩阵法	147
2.4.5	两根无微扰光纤之间的连接器功率损耗	149
2.4.6	两根微扰光纤之间的连接器功率损耗	154
2.4.7	连接器时间色散特性的概述	156
第三章	换能器	158
3.1	光源	158
3.1.1	平行光束激光器	159
3.1.2	顶发光二极管	162
3.1.3	边发光二极管	165
3.1.4	激光二极管	166
3.1.5	激光发射的某些缺陷	169
3.1.6	激光器的结构	173
3.1.7	发光二极管和激光二极管的光谱特性	174
3.1.8	发光二极管和激光二极管的调制特性	175
3.2	光电检测器	177
3.2.1	对现有的光电检测器的评述	178
3.2.2	太阳能电池和PIN光电二极管	180
3.2.3	雪崩光电二极管(APD)	184
3.2.4	有关光电二极管噪声的某些考虑	185
3.2.5	光电二极管的光谱特性	190
3.2.6	光电二极管的调制特性	192
第四章	传输系统	195
4.1	采用强度调制的传输系统	195
4.1.1	发光二极管和激光器驱动器	196
4.1.2	前端的种类	197

4.1.3	模拟接收器	201
4.1.4	数字接收器	202
4.1.5	均衡	204
4.1.6	强度调制系统的传输容量和中继器间距的极限	208
4.2	相干传输系统	208
4.2.1	相干系统与常规系统比较所具有的优点	209
4.2.2	实用相干传输系统的主要问题	211
第五章 扫描测量		212
5.1	光纤的扫描测量	212
5.1.1	绕射限制	213
5.1.2	光学设备	213
5.1.3	微分模衰减测量	216
5.1.4	微分模延时测量	217
5.1.5	研究模式耦合效应的间接测量	217
5.1.6	域 (r, θ) 的优点	220
5.2	换能器的扫描测量	223
5.2.1	发光二极管和激光二极管的扫描测量	224
5.2.2	光电二极管的扫描测量	225
第六章 换能器的测量		227
6.1	积分测量	227
6.1.1	发光二极管和激光二极管的电特性	228
6.1.2	电光换能及其基带响应的测量	230
6.1.3	光电二极管的电特性的表征	233
6.1.4	响应度及其基带响应的测量	235
6.1.5	激光二极管可靠性试验	236
6.2	微分测量	237

6.2.1	发光二极管和激光二极管的发光功率的光谱分布测量	238
6.2.2	发光二极管和激光二极管的近场图和远场图的测量	240
6.2.3	发光二极管发光的空间相对延时的测量	243
6.2.4	辐射范围和发光的空间相对延时的理论模型	244
6.2.5	激光二极管和发光二极管的光谱和几何参数的微分测量	249
6.2.6	光谱和响应度与几何形状的关系的测量	253

第七章	折射率分布测量	256
7.1	光纤的折射率分布测量	256
7.1.1	近场扫描技术	257
7.1.2	折射率近场扫描技术	260
7.1.3	切片干涉测量技术	262
7.1.4	反射法	263
7.1.5	横向干涉测量技术	264
7.1.6	横向聚焦技术	266
7.1.7	其它方法的简单述评	267
7.1.8	比较结果讨论	268
7.2	预制件折射率分布测量	270
7.2.1	也可适用于光纤折射率分布的折量技术	270
7.2.2	光线跟踪	271
7.2.3	光纤及其原始的预制件之间的比较	272

第八章	几何参数的测量	274
8.1	光纤截面的测量	274
8.1.1	光纤端面的直接检查	275
8.1.2	近场技术	276

8.1.3	外径测量	278
8.1.4	光纤外表的椭圆度测量	280
8.1.5	数值孔径的测量	282
8.2	光纤长度测量	282
8.2.1	采用后向散射法测量光纤长度	283
8.2.2	采用锁定放大器的光纤长度测量	284

第九章 衰减测量 286

9.1	现有技术的评述	287
9.1.1	截断法	287
9.1.2	后向散射技术 (OTDR)	291
9.1.3	工艺测量	294
9.1.4	横向散射检测法测量总损耗	298
9.1.5	插入损耗的测量	299
9.1.6	接头损耗测量	299
9.1.7	光纤制造时的在线测量	302
9.2	截断法的讨论	303
9.2.1	光束注入器和搅模器	303
9.2.2	截断法测量的精度	305
9.2.3	光谱损耗测量	309
9.2.4	改变注入条件所进行的测量	312
9.3	有关后向散射的讨论	315
9.3.1	注入技术	316
9.3.2	光线的后向散射功率的分布	318
9.3.3	光纤参数波动的影响	321
9.3.4	局部附加损耗的测量	324
9.3.5	后向散射测量中各种噪声源的分布	326
9.3.6	动态范围的限制	329
9.3.7	后向散射测量的精度	333
9.3.8	光频域反射测量技术的概述	335

9.4	微分模衰减测量	336
9.4.1	阶跃型光纤的微分模衰减的测量	336
9.4.2	渐变型光纤的微分模衰减的测量	337
9.4.3	微分模衰减测量精度的讨论	339
第十章	时间色散测量	343
10.1	一般考虑	344
10.1.1	时间色散测量的实验结果的外推法	344
10.1.2	时域测量	346
10.1.3	频域测量	350
10.1.4	模间色散测量	352
10.1.5	材料色散测量	354
10.1.6	折射率分布色散的实验评价	359
10.2	时域测量的讨论	361
10.2.1	时域测量不确定性的主要原因	362
10.2.2	采用锁相放大器提高信噪比	367
10.2.3	采用检测程序以减小总的不确定性	368
10.2.4	有效输入脉冲的评价	369
10.3	频域测量的讨论	370
10.3.1	光纤的传递函数	370
10.3.2	频域测量中不确定性的主要原因	373
10.3.3	改善最大动态范围的方法	375
10.3.4	用希耳伯特变换评价相位响应	376
10.3.5	相位响应的直接测量	377
10.3.6	频域测量的总精度	379
10.4	微分模(式)延时(DMD)测量	382
10.4.1	DMD测量的目的	382
10.4.2	阶跃型光纤的DMD测量	385
10.4.3	渐变型光纤的DMD测量	386
10.4.4	微分模延时测量精度的讨论	388

第十一章	模式耦合现象的间接测试	390
11.1	根据模式幅值功率分布进行的测试	390
11.1.1	选择激励状态下模式幅值功率分布的测量	391
11.1.2	稳态下模式功率的幅值功率分布的测量	392
11.2	根据模式功率的幅值延时分布进行的测试	393
11.2.1	测量与模式有关的衰减以及耦合系数时用的理论模型	393
11.2.2	对与模式有关的衰减和耦合系数进行的测量	396
11.2.3	在有模式耦合的时候用于间接评价光纤基带响应的理论模型	397
11.2.4	在有模式耦合存在的情况下,用间接测试法对光纤基带响应进行的测量	401
第十二章	单模光纤的测量	405
12.1	单模光纤的折射率分布和几何参数的测量	405
12.1.1	单模光纤的折射率分布测量	404
12.1.2	截止波长测量	405
12.1.3	单模模斑尺寸测量	408
12.1.4	等效阶跃折射率分布测量	409
12.1.5	单模光纤纤芯—包层同心度和纤芯椭圆度的测量	410
12.1.6	单模光纤数值孔径 NA 的测量	411
12.2	单模光纤的传输测量	411
12.2.1	单模光纤的衰减测量	412
12.2.2	单模光纤的时间色散测量	414
附录一	光纤测量中的光学仪器	416
1. a	单色仪	416
1. b	光调制器	420
. VII .		

1 . c	显微镜物镜	— — — — —	— 321
1 . d	光定向耦合物	— — — — —	— 422

附录二	光纤测量中常用的电子仪表	— — — — —	— 424
2 . a	锁定放大器和遮光器	— — — — —	— 424
2 . b	Boxcar积分器	— — — — —	— 426

附录三	光纤端面的制备	— — — — —	— 428
3 . a	光纤切断法	— — — — —	— 428
3 . b	光纤断裂角度的检查方法	— — — — —	— 429

第一章 光在理想多模光纤中的传播

光在多模光纤中的传播的描述有两种方法：

- 1) 电磁模型
- 2) 几何光学模型

当很少几个模式传播时，电磁模型也可以被应用，而只有在很多模式（至少几百个模式）传播时，几何光学能得到可以接受的结果。后一个模型的主要特点是描述的简单性、即时性以及可以方便地通过实验观察来支持这种理论。

下面，在简单概述了电磁模型之后，研究了光传播的几何光学方法。这样做被证明是合理的。因为在光传输线路里，通常用的多模光纤传输几百个模式。而且，在这一章以及后面几章中，我们将常常想起电磁理论。事实上在将描述的实验设备中，由于光的电磁性而存在着某些局限。

1.1 电磁模型概述

理想的介质波导由两种无损耗介质媒质之间的界面所组成。一般来说，有一个折射率为 n_1 的内媒质和折射率为 n_2 的外媒质。光要传播的话，必须满足 $n_1 > n_2$ 的条件。事实上，无损耗传播是建立在导引波在界面上的全内反射的基础上的。

广义的介质波导的原理示于图

1.1上。介质波导的定义也可扩大到只有均匀的外介质的情况。在这种情况下，只有 n_2 是常数，而 n_1 是在

横向平面（图1.1的 x, y 平面）上确定的一组坐标的函数。 $n_1 > n_2$ 的条件至少在内区间的某些点上必须证明是成立的。这理想介质波导的定义必然使几何特性或物理特性与 z 轴的坐标无关。在第二章中，我们将用实际的光波导作为有损耗的、并且用沿 z 轴的微扰来表征的光波导。

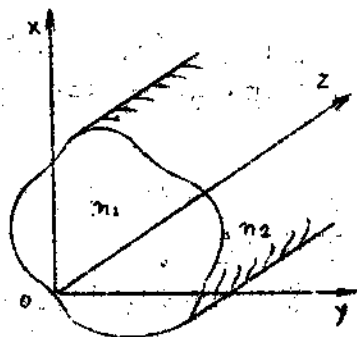


图1 广义的介质波导

1.1.1 一般考虑

各向同性的介质波导的折射率的定义为

$$n = \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{\mu_0 \epsilon_0}}$$

式中 μ, ϵ 分别为媒质的导磁率和介电常数

μ_0, ϵ_0 是自由空间的导磁率和介电常数

n 的不同值可以在 μ 保持常数的情况下通过改变 ϵ 来得到, 因此

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$$

长距离信息传输使用的介质光波导通常用 SiO_2 来制造。为了获得内媒所需的折射率分布, 它适当地被掺杂。最常用的掺杂剂是锗、磷、硼。这种具有圆对称结构的波导称为圆光纤。然而, 实际的光纤的横截面不是理想的圆, 而是呈现百分之几的椭圆度。

圆光纤的内媒质称为纤芯, 外媒质称为包层。在通信中使用两种光纤:

1) 阶跃型光纤, 其特点是具有均匀折射率 n , 的均匀光纤。

2) 渐变型光纤, 折射率渐变分布 $n(r)$, 其中 r 表示半径的座标。

表征后一种光纤的折射率渐变分布为导模波越时间提供均衡, 从而减小了时间色散。

在本节中, 我们将简单地回顾一下一般传播方程的电磁场理论, 现在来考虑一下单色电磁波的电场 $\vec{E}(r, \phi, z; t)$ 和磁场 $\vec{H}(r, \phi, z; t)$, 其中 r, ϕ, z 是圆柱座标; t 表示与时间的关系。在没有任何源的情况下, 这些场满足麦克斯韦方程

$$\nabla \times \vec{E}(t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(t)}{\partial t}, \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H}(t) = \epsilon \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t}$$

≈ 2 ≈

经傅里叶变换，並令 ν_λ 等于光频，这两方程就成为

$$\nabla \chi \bar{\mathcal{E}}(t) = i 2\pi \nu_\lambda \mu \bar{\mathcal{E}} \quad (1.2)$$

$$\nabla \chi \bar{\mathcal{H}}(t) = i 2\pi \nu_\lambda e \bar{\mathcal{H}}$$

式中， i 为虚数单位，而

$$\bar{\mathcal{E}}(t) = \text{Re}[\bar{\mathcal{E}} \exp(i 2\pi \nu_\lambda t)]$$

$$\bar{\mathcal{H}}(t) = \text{Re}[\bar{\mathcal{H}} \exp(i 2\pi \nu_\lambda t)]$$

由 (1.2) 式，可以推导出

$$\begin{aligned} \nabla \chi (\nabla \chi \bar{\mathcal{E}}) &= \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathcal{E}}) \cdot \nabla^2 \bar{\mathcal{E}} \\ &= (2\pi \nu_\lambda)^2 \mu e \bar{\mathcal{E}} \end{aligned}$$

因为 $\nabla \cdot \bar{\mathcal{E}}$ 与电荷密度成比例，並且假设没有源，则得到

$$\nabla^2 \bar{\mathcal{E}} = -(2\pi \nu_\lambda)^2 \mu e \bar{\mathcal{E}} \quad (1.3)$$

用同样的方法

$$\nabla \chi (\nabla \chi \bar{\mathcal{H}}) = \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathcal{H}}) \cdot \nabla^2 \bar{\mathcal{H}} = (2\pi \nu_\lambda)^2 \mu e \bar{\mathcal{H}}$$

因为 $\nabla \cdot \bar{\mathcal{H}} = 0$ 总是成立的，所以可以看出

$$\nabla^2 \bar{\mathcal{H}} = -(2\pi \nu_\lambda)^2 \mu e \bar{\mathcal{H}} \quad (1.4)$$

方程式可以写成下列形式

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{\mathcal{E}} + k^2 \bar{\mathcal{E}} &= 0 \\ \nabla^2 \bar{\mathcal{H}} + k^2 \bar{\mathcal{H}} &= 0 \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$k^2 = (2\pi \nu_\lambda)^2 \mu e$$

这个方程称为亥姆霍茨方程。麦克斯韦方程和亥姆霍茨方程是任何波导传播的基础。在 z 作为传播方向的情况下，假设下面的试探证明是合理的

$$\begin{aligned}\bar{\mathcal{E}}(r, \phi, z) &= \bar{E}(r, \phi) \exp(i\beta z) \\ \bar{\mathcal{H}}(r, \phi, z) &= \bar{H}(r, \phi) \exp(-i\beta z)\end{aligned}\quad (1.6)$$

式中 β 表示相位常数，把 (1.6) 式代入 (1.5) 式得到

$$\begin{aligned}\nabla_t^2 \bar{E} &= -\chi^2 \bar{E} \\ \nabla_t^2 \bar{H} &= -\chi^2 \bar{H} \\ \chi^2 &= k^2 - \beta^2\end{aligned}\quad (1.7)$$

式中 ∇_t^2 为横坐标上的拉普拉斯算子，在介质波导中，把波数 k 表示成为折射的函数更为方便。设 c 为自由空间的光速， λ 为真空中的波长，则下列关系可以成立

$$\begin{aligned}v_\lambda &= \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \cdot \frac{1}{\lambda} \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda} n\end{aligned}\quad (1.8)$$

我们必须写出内、外两种介质的 (1.7) 式

$$\begin{aligned}\chi_i^2 &= k_i^2 - \beta^2 \\ \chi_i^2 &= \beta^2 - k_i^2 \quad k_i^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 n_i^2 \quad i=1, 2\end{aligned}\quad (1.9)$$

由此而得出：

$$\begin{aligned}\nabla_t^2 \bar{E}_1 &= -\chi_1^2 \bar{E}_1, & \nabla_t^2 \bar{H}_1 &= -\chi_1^2 \bar{H}_1, \\ \nabla_t^2 \bar{E}_2 &= \chi_2^2 \bar{E}_2, & \nabla_t^2 \bar{H}_2 &= \chi_2^2 \bar{H}_2.\end{aligned}\quad (1.10)$$

把(1.6)式代入(1.2)式, 可以从已知的轴向分量 E_z, H_z ^[1]推导出横向场分量的四个关系式。这样就可以只考虑(1.10)式中的轴向分量, 从而使问题本身限于标量问题。

1.1.2 阶跃折射率圆光纤的精确电磁场理论

假设一组圆柱坐标 (r, θ, z) , 由(1.10)式得到

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial \phi^2} = -\chi_1^2 \Psi_1,$$

$$\Psi_1 = E_{z1}, H_{z1}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial \phi^2} = \chi_2^2 \Psi_2,$$

$$\Psi_2 = E_{z2}, H_{z2}$$

用变元分离法, 设

$$\Psi_j(r, \phi) = R_j(r) \phi_j(\phi), \quad j=1, 2$$

并代入上述的一般方程

$$\frac{d^2 R_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_1}{dr} + \left(\chi_1^2 - \frac{v^2}{r^2} \right) R_1 = 0$$

$$\frac{d^2 \phi_1}{d\phi^2} = -v^2 \phi_1$$

$$\frac{d^2 R_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_2}{dr} + \left(-\chi_2^2 - \frac{v^2}{r^2} \right) R_2 = 0$$

(1.11)

$$\frac{d^2 \phi_2}{d\phi^2} = -v^2 \phi_2$$

式中 v^2 是一个正实数的常数。通解为