

光纤测量原理

【美】 D. 马库塞 著
杜柏林 于耀明 译

人民邮电出版社

Principles of Optical
Fiber Measurements
DIETRICH MARCUSE
ACADEMIC PRESS

1981

内 容 提 要

本书系统而全面地介绍了光纤特性的测量原理和方法，前两章概述了光纤的主要参数和传输理论基础。其后对迄今为止较成熟的一些测量方法作了详细的介绍和分析，对于一些测量的新技术，例如剖面色散法以及单模光纤有关参数的测量方法，也作了较多的介绍。

本书特点是理论与实验密切结合，可供大专院校有关专业的师生参考，也可供从事光纤研究与制造的科技人员参考。

光 纤 测 量 原 理

〔美〕D. 马库塞 著

程柏林 于耀明 译

责任编辑：李树岭

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本：850×1168 1/32

1986年12月第一版

印张：12 12/32 页数：198

1986年12月河北第一次印刷

字数：325 千字

印数：1-2,500 册

统一书号：15046·总3129-有5442

定价：3.20 元

译 者 序

本书作者D.马库塞博士是美国贝尔实验室的光纤专家，在光纤理论和实验两方面都有很深的造诣。作者曾先后在有关刊物上发表了关于光纤理论与光纤特性测量方法的许多论文，并陆续出版了《传输光学》(Light Transmission Optics)、《介质光波导理论》(Theory of Dielectric Optical Waveguides)及《光纤测量原理》(Principles of Optical Fiber Measurements)等书籍。这些论文与书籍在国际上均有很高的学术地位。

本书较系统、全面地介绍了光纤特性的测量原理和方法，前两章概括地介绍了光纤的主要参数和光纤传输理论基础。书中对迄今为止较为成熟的一些测量方法作了详细的介绍和分析，例如测量损耗的量热法、剪断法和光学时域反射仪法，测量带宽的时域法和频域法，以及测量光纤剖面折射率分布的反射法、折射法、切片干涉法、横向干涉法和聚焦法等。对于一些新技术，例如剖面色散法以及单模光纤有关参数的测量方法，也作了颇多的介绍。此外，本书还对多模光纤的激励条件作了细致的分析，并介绍了测量光纤几何尺寸的方法及制造光纤预制棒的工艺原理。

本书的特点是理论与实验密切结合，对于指导光纤实验以及改进光纤制造工艺来说的确是一本好书。本书可供高等院校中有关专业的教师、学生、研究生参考，也可供从事光纤研究和制造的研究所和工厂的技术人员参考。

近年来，我国光纤通信事业正在迅速发展，光纤通信已列入国家重点发展项目。本书中文版的出版，将有助于加速我国光纤通信事业的发展。

由于译者水平所限，本书译文难免存在着缺点和错误，敬请读者批评指正。

译者

1983年2月

序

光纤通信技术正在迅速发展。在世界上的许多国家中，进入电话网的光纤系统的数量急剧地增加，与光纤有关的商品的种类也在逐渐增加，这些都说明光纤通信技术的重要性正在不断增长。

由于人们对光纤的兴趣越来越大，而且光纤的生产工艺现已进入成熟阶段，因此现在有必要编写一本叙述光纤测量的基本原理的书籍。

任何科学技术领域的进步都依赖于对被研究的对象作出精确测量的能力。光通信领域肯定也不会违反这条规律。可以举一个例子来说明，这个领域的极其迅速的发展主要是由于减小了光纤损耗，其减小的程度几乎到了理论上的极限。为减小光纤损耗需要认真研究新的测量损耗的方法。测量光纤的所有有关参数的能力必须随着光纤性能的迅速改进而得到相应的提高，并在许多场合促进了改善了光纤的性能。例如，当 $1.3\mu\text{m}$ 波长范围的优点变得明显时，必须把损耗测量扩大到较长的波长。同样，必须研究用以测量色散与波长关系的新方法，并把它扩大到 $1.3\mu\text{m}$ 和更长的波长范围。为了测量单模光纤中非常小的色散而需要特殊的技术。

除了有助于改进光纤的生产工艺以外，作为指导光纤的用户来说，测量也是需要的。测量可以确定所使用的元件的特性，因此使得有可能确定光纤系统其他元件的技术规格，从而有助于整个系统的设计。生产光纤的厂家需要进行测量，以使它们能够拟定其产品的技术规格，以向光纤的用户证明，他们所买到的正是他们希望得到的产品。

本书涉及大多数光纤测量的原理，但只限于光学方法，而不包括如测量抗拉强度之类的机械方法。虽然本书涉及范围广泛的课

题，但叙述得愈透彻的必然是著者精通的那些方法。此外，我不可能对应用于同一种测量的各种竞争性方法提供精确的比较。甚至在积累了使用某种方法的长期经验后，要想对该种方法的准确度作出估计也是困难的，而要想对不同的方法的准确度作出比较，那末就更加困难了。

本书是为范围广泛的同行编写的。它可供希望配备或改进光纤测量设备以及想更多地了解光纤性能的人们作为入门书使用。本书也可供这一领域和光学测量领域中的专家和希望成为专家的人们参考，一般说来，他们只想得到特定的资料或对这个越来越重要的领域作概括的了解。本书始终强调的是测量方法的物理原理。但是对实际测量方法的叙述也是足够详细的，以使熟练的实验人员在测量过程中能够设计他们自己的仪器。

最后，就阅读本书时所需要的基础知识说一句话：本书需要多方面的基础知识；某些测量方法是易于了解的，不需要详尽的物理学知识，而另一些测量方法则需要麦克斯韦理论和射线光学的知识。在叙述基础知识的第二章中，对需要用到的物理原理和概念进行了解释。具有麦克斯韦理论的基本知识的读者，在阅读本书中所使用的数学方法和物理概念时，应当不会有什么困难。然而，缺乏这种基本知识的读者也不必感到失望。他们也许不能理解某些论证的所有细节，但是他们可以从对测量方法所应用的实际装置的描述中得到足够的资料，这也有助于他们把这些资料应用于自己的工作。

我应当对许多人表示感谢。书中被引用的著作的作者太多，不能一一加以列举；在每章末的参考文献中，列出了他们的名字。我应当向本书中没有叙述他们的成果的那些作者表示歉意；任何遗漏都是由于我的无知造成的，而不是出于恶意。光纤测量领域已有了很大的发展；因此不可能叙述业已完成的一切有价值的工作；这里作出的抉择反映了本书著者的主观选择，并且为了缩小本书的篇幅而不得不这样做。我特别感谢L.G.Cohen，他慷慨地向我提供他

的优秀著作中的许多幅插图；特别感谢他以及D.Gloge、T.Li和E.A.J.Marcatili提出的意见和建设性的批评。

如果没有我的朋友和同事Herman M. Presby的帮助，本书是不可能写成的。多年以来，在研究测量光纤参数的不同的方法方面，Herman和我一直密切合作。他在实验物理学方面的经验和永不减退的工作热情，保证我们所承担的每个科研项目都获得成功。

我也非常感谢贝尔实验室，因为它使得我有可能在这一有意义的领域中进行工作。

目 录

第一章 概 论

1.1 简史	(1)
1.2 光纤的结构	(2)
1.3 单模和多模光纤	(5)
1.4 渐变折射率光纤	(6)
1.5 光纤的损耗	(7)
1.6 多模光纤的色散	(8)
1.7 单模光纤的色散	(9)
参考文献	(10)

第二章 基 本 原 理

2.1 射线光学	(12)
2.2 WKB 法	(28)
2.3 弱波导模式	(39)
2.4 损耗机理	(43)
2.5 色散	(61)
参考文献	(74)

第三章 横向后向散射法

3.1 裸光纤和突变折射率光纤的折射率	(76)
3.2 光纤外径的测量	(91)
3.3 椭圆形形变的测量	(104)
3.4 套层偏心率的测量	(114)

参考文献	(128)
------	---------

第四章 测量折射率分布的方法

4.1 反射法	(131)
4.2 近场法	(135)
4.3 折射法	(144)
4.4 切片干涉法	(155)
4.5 横向干涉法	(164)
4.6 折射角法	(177)
4.7 聚焦法	(183)
4.8 对椭圆形芯子的推广	(209)
参考文献	(214)

第五章 损耗的测量

5.1 光纤的光激励	(216)
5.2 量热法	(225)
5.3 散射损耗的测量	(233)
5.4 剪断法	(248)
5.5 光时域反射计 (OTDR)	(258)
5.6 微分模式损耗	(267)
参考文献	(276)

第六章 色散的测量

6.1 时域测量	(278)
6.2 频域测量	(299)
6.3 微分模式延迟	(313)
6.4 由折射率分布计算模间色散	(319)
6.5 剖面色散	(332)
参考文献	(336)

第七章 光纤和预制棒几何形状的测量

7.1 单模光纤的 V 值	(339)
7.2 光纤直径的测量	(349)
7.3 光纤几何形状的测量	(363)
7.4 预制棒的检测	(372)
参考文献	(381)

第一章 概 论

1.1 简 史

从历史上来看,电磁波通信趋于使用越来越高的频率。最初的无线电通信发送的电磁波是千米波,后来,发送的电磁波的波长很快就缩短到米波和分米波。人们在掌握了用空心金属波导管传输微波的毫米波段的通信技术以后,通信事业又获得一个很大的飞跃,进入了利用光谱的可见光区和近红外区中的光波频率的阶段。激光器的发明加快了这个飞跃过程。早期的研究工作涉及在大气或管道中利用透镜列波导传输激光束。

从原理上来说,光导纤维*是具有吸引力的另一种光波导,但在早期,光纤的损耗非常大,这一点使得光纤似乎不可能与已有的这些电磁波通信方式进行有效的竞争。后来高琨〔1〕指出,石英玻璃是一种有希望的材料,不久,低损耗光纤就出现了〔2〕。

为了正确了解在光纤的损耗方面所作出的重大改进,我们必须回想一下,光学性能良好的普通玻璃的损耗约为1000dB/km。让我们暂时停下来,考虑一下这个数值意味着什么。以分贝(dB)为单位的损耗 α 定义为输入功率 P_i 与输出功率 P_o 的比值的对数(以10为底)的10倍,即:

$$\alpha = 10 \log_{10} (P_i / P_o) \quad (1.1-1)$$

光信号在损耗为1000dB/km的光纤中传输1km以后,其输出功率与输入功率的比值 $P_o / P_i = 10^{-100}$!显然,利用衰减这样大的媒质进行通信是不现实的。高琨〔1〕测量了纯石英玻璃的块状样品的损耗,发现其数值约为几十dB/km。1970年,康宁玻璃公司报道

以下简称光纤—校注

制成了损耗为 20dB/km 的高纯度石英玻璃光纤^[2]。十年以后，有人报导了在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处制成损耗为 0.2dB/km 的光纤^[3]。在光纤的损耗是如此小的情形下，光纤通信提供了一种能够代替无线电通信和传统的有线通信的令人鼓舞的新型通信方式。

1.2 光纤的结构

光纤的结构是怎样的呢？形式最简单的光纤由两层同轴的均质玻璃组成，如图1.1.1所示。因为图1.1.1所示的折射率分布是一个阶跃函数，因此我们把这种光纤称为突变折射率光纤^[4-6]。纤芯材料的折射率必须比包层的折射率大，其原因将在第二章中探讨。

大多数光纤都具有比图1.1.1所示的层次更多的层次。图1.1.2所示的光纤由不均匀的纤芯、纤芯外面的包层以及最外面起保护作用

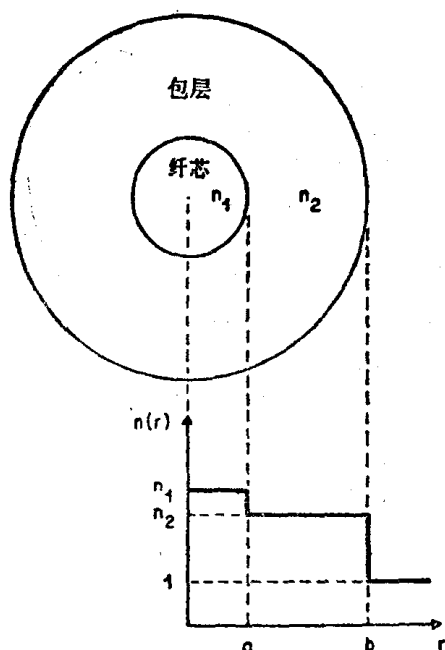


图 1.1.1 突变折射率光纤的横截面。图中示出了纤芯、包层和折射率分布 $n(r)$

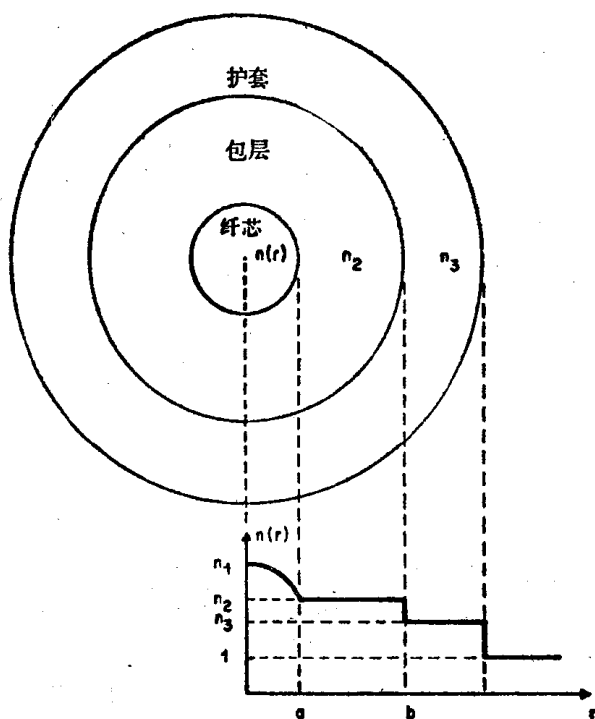


图 1.1.2 渐变折射率光纤的横截面。图中示出纤芯、包层、套层和折射率分布 $n(r)$

用的塑料套层组成。套层用来保护光纤免受物理损伤。这种保护措施极为重要，因为光纤表面上的伤痕会引起应力集中，进而形成微裂纹，这种微裂纹很容易加深和变长，从而使抗张强度减小〔7—8〕。图1.1.2所示的光纤纤芯的折射率分布不是常数，而是随径向坐标的增加而改变的，因而称为渐变折射率光纤。

目前，大多数低损耗光纤是利用化学汽相沉积法（CVD）或改进的化学汽相沉积法（MCVD）制作的〔9〕。改进的化学汽相沉积法利用一根石英玻璃管，管中导入氧气与氯化物蒸汽（ SiCl_4 、 GeCl_4 等）的混合气体。把石英玻璃管加热到高温，以使氯化物蒸气分解，并使掺有二氧化锆的二氧化硅沉积在管壁上。大多数掺杂

剂都会使石英玻璃的折射率增加。当玻璃层沉积时，慢慢地增加掺杂剂的浓度，就可以使中心区域具有所需要的逐渐变化的折射率。当沉积层增加到足够的厚度时，把管子加热到较高的温度而使其烧缩收实，从而变成一根实心的棒，称为光纤预制棒，或简称为预制棒。对预制棒的某一端进行加热，并把软化的玻璃拉成象头发丝一样的细线，就可以由预制棒拉制出光纤。拉丝工艺的一个重要特点是，预制棒的折射率分布的形状可以保持下来，因而光纤纤芯也具有同样的折射率分布（除了径向坐标的标度改变以外）。这就有可能根据测得的预制棒的折射率分布来得到光纤的剖面折射率分布。

因为改进的化学汽相沉积法是把玻璃逐层沉积在管的内壁上的，因而可以观测到预制棒的折射率分布存在着层状结构。由于光学分辨率的限制，通常只能在纤芯的中心（这里的沉积层往往是最厚的）附近才能观测到光纤中的层状结构。早期用化学汽相沉积法和改进的化学汽相沉积法制作的预制棒和光纤的中心处都存在着折射率凹陷（中心凹陷）^[10]。这种凹陷是由于在制作预制棒的烧缩收实阶段所使用的高温，使掺杂材料（通常是锗）发生蒸发而引起的。通过在烧缩收实过程中提供额外的掺杂剂气体，以补充蒸发掉的掺杂剂，就可以避免产生这种中心凹陷。然而，本书中作为例子示出的大多数折射率分布仍然是存在中心凹陷的。

制作预制棒的另一种方法是利用火焰的水解作用，使玻璃微粒沉积于正在形成的预制棒末端。这种轴向汽相沉积法（VAD）看来适合于生产长度大的预制棒^[11]。其他若干种方法也可以用来生产低损耗光纤，但对这些方法的讨论超出了本书的范围。

大多数掺杂剂都会使石英玻璃的折射率增加；然而，硼与氟则有着相反的作用。因为光纤纤芯的折射率必须比最接近于它的外围区域的折射率大，因此可以用纯石英玻璃作为纤芯和用硼掺杂或氟掺杂的石英玻璃作为包层而制作突变折射率光纤^[12]。有时，在沉积的低损耗纤芯与损耗较大的石英玻璃包层之间加入硼硅酸盐阻挡层。在这种情形下，光波往往不能进入低折射率的硼硅酸盐阻挡

层，因此可以避免与损耗较大的光纤的外层发生相互作用。

在许多教科书^[4-6,13,14]中，都讨论了光纤中的光波导理论，本书不再重复叙述，但我们想讨论几个最重要的基本概念，以帮助读者进行复习。

1.3 单模和多模光纤

光纤能够承载许多称为模式的传导波形^[13, 14]。对于需要非常大的信号带宽的通信应用来说，单模光纤是重要的。单模光纤只能承载一种波形（模式），但这种波形可能以两种相互正交的偏振状态存在。多模光纤可以承载几百到几千个模式。光纤所能承载的模式总数依赖于如下定义参数 V 值^[15]：

$$V = n_1 k a \sqrt{2\Delta} \quad (1.3-1)$$

式中各个符号的含义如下， k 是自由空间中平面波的传播常数，它可以表示为 $k = 2\pi/\lambda$ ，这里 λ 是纤芯所传输的光波在真空中的波长。 a 是纤芯的半径； n_1 是纤芯折射率的最大值，如果不存在中心凹陷，则这一最大值应当位于光纤的轴线上。最后，参数 Δ 是对最大折射率与包层折射率 n_2 之间的相对差值的大小的一种量度，它等于：

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad \text{或} \quad \Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$$\text{当 } \Delta \ll 1 \quad (1.3-2)$$

对于突变折射率光纤，两种极化状态的传导模的总数是：

$$N = \frac{1}{2} V^2 \quad (1.3-3)$$

光纤的另一个重要参数是数值孔径 (NA)，它的定义为：

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3-4)$$

如果我们考虑到，数值孔径与能够被封闭在纤芯中的光辐射在进入光纤时的最大角度有关，也与在光纤末端处辐射到空间中去的辐射

射在离开光纤时的最大角度有关，那么数值孔径的重要性是明显的。数值孔径与纤芯内的最大角度 θ_c 或与空气中的最大辐射角 θ_a 的关系是：

$$NA = n_1 \sin \theta_c = \sin \theta_a \quad (1.3-5)$$

在纤芯和空气中的这两个角度之间的关系由将在第2.1节中导出的斯涅耳定律给出。

1.4 渐变折射率光纤

渐变折射率光纤的剖面折射率分布往往可以用下述类型的幂定律*近似地表示^[16]：

$$n(r) = \begin{cases} n_1(1 - (r/a)^g \Delta) & \text{当 } r < a \\ n_1(1 - \Delta) = n_2 & \text{当 } r > a \end{cases} \quad (1.4-1)$$

式中 r 是径向坐标， g 是幂律的指数。

与单模光纤相比，多模光纤既有缺点，也有优点。多模光纤的芯径较大，这有利于光的注入和同类光纤之间的连接。另一个优点是多模光纤可以用发光二极管(LED)进行激励，而单模光纤则必须用激光器进行激励。对于测量的目的来说，单模光纤有时可以用非相干光进行激励，但对于通信的目的来说，只有激光器才能供给单模光纤以足够数量的光功率。与半导体激光器相比，发光二极管比较容易制作，并具有较长的寿命，因此在某些应用中必须使用它们。

多模光纤存在模间色散。能够在多模光纤中传播的许多模式并不都以同样的速度行进。激励到光纤中的脉冲会把它的能量分配给所有(或至少是许多)的模式。每个模式到达光纤末端的时间的微小差异，使得脉冲发生展宽，脉冲的这种展宽与光纤的长度成正比。妥善地设计折射率分布的形状，可以减小这种模间色散效应。就幂律型折射率分布而言，当不存在材料色散时，指数^[17]

* 原文为Power law，或译为幂函数。一校注

$$g = g_{opt} = 2 - (12/5)\Delta \quad (1.4-2)$$

可使模间色散具有最小值。因为所有的玻璃都存在（材料）色散，因此 g 的最佳值的实际数值与式（1.4-2）稍有不同^[17]。材料的色散特性可以单独加以测量，从而有可能由测得的折射率分布计算光纤的脉冲特性。因此，了解纤芯的折射率分布是非常有用的。折射率分布的形状决定了除损耗以外的光纤的大多数特性。

1.5 光纤的损耗

引起损耗的机理有若干种，在光谱的红外区和紫外区中，所有的玻璃都会产生强烈的吸收。红外吸收是由分子振动引起的，而紫外吸收则是由于玻璃分子中电子的跃迁引起的。这些基本的损耗过程的细小的尾部可以延伸到光谱的可见光区域。然而，在我们所关心的光谱范围内，由于微量的水分（很难把它完全除去）所产生的象OH离子之类的杂质所引起的吸收损耗是更加重要的。除非对光纤的材料进行高度的提纯，否则象铁、铜、钴和镍之类的微量金属离子会在光谱的可见光区和近红外区中产生显著的吸收谱线。去除光纤材料中此类杂质是一项需要付出很大代价的而又必须做的工作^[18, 19]。

吸收损耗并不是引起功率损失的唯一原因。几何形状的任何类型的缺陷或在沿光纤的轴线上以固有速率发生变化的折射率涨落会使模式彼此发生耦合^[13, 14]。传导模之间的耦合不会引起损耗，但是光纤中的模式范围并不只限于传导模。还存在着不封闭在纤芯中的模式。在具有无限扩展的包层的光纤中，“辐射模”就是这样的模式。在包层有一定厚度的实际的光纤中则存在包层模，它们在包层和纤芯中都传输功率。光纤的缺陷使传导模（纤芯模）与包层模以及把能量辐射到光纤周围的空间中去的辐射模发生耦合。与包层模耦合的功率就损失掉了，因为这种模式在与有耗光纤套层发生相互作用时会产生很大的吸收损耗。由于这些耦合过程，使光纤的缺