

# 单模光纤的特性参数及特性的理论分析

陆锐勇 2009012303

皖西学院信息工程学院通信工程 2009 级 02 班

摘要：本文通过在理论上对单模光纤的特征参数（即影响单模光纤的传输效率因素），以及衰减特性的分析。在单模光纤中存在弯缩损耗，材料对信号的吸收及模内色散等现象。并结合实际应用的技术规范，对单模光纤的生产要求和研发趋势进行简单的总结和概述。

关键词：单模光纤、色散、宏弯损耗、微弯损耗、吸收

Abstract: Based in theory of single mode fiber characteristic parameters (i.e. the effects of single mode optical fiber transmission efficiency factors ), and attenuation characteristics analysis. In a single-mode fiber in the presence of bending loss, material absorbs the signal and intramode dispersion phenomenon. Combined with the practical application of the technical specification for single-mode fiber, the production requirements and development trend for simple summary and overview.

Key words: A single-mode optical fiber, dispersion, macro bending loss, microbending loss, absorption

## 一、 光纤的介绍

光纤是一种高度透明的玻璃丝，由二氧化硅等高纯度玻璃经复杂的工艺拉丝制成。光纤从横截剖面看可以分为三部分，即折射率较高的芯区、折射率较低的包成、表面涂覆层。包层和涂覆层的作用是满足光纤能够导光的需求，涂覆层是为了防止光纤表面微小裂纹的扩大，从而增强光纤的机械强度。

光纤的种类有很多，根据光纤中的传输模式的多少可以分为单模光纤和多模光纤。单模光纤指在给定的工作波长上，只能传输单一模式的光纤。因为单模光纤中不存在模式色散，所以具有几十吉赫兹以上的传输频段，有利于大容量、长距离、高码速的信息传输。

目前 ITU-T 已经在建议 G.652、G.653、G.654、G.655 和 G.656 中分别定义了 5 种不同设计的单模光纤。其中 G.652 光纤是目前应用最广泛的标准单模光纤，称为 1310nm 性能最佳的单模光纤；G.652 光纤还可以分为 G.652.A、G.652.B、G.652.C、G.652.D。

## 二、 光纤在光纤通信系统的应用

光纤通信系统主要由发送端机、光纤传输信道、接收端机组成。光纤是光纤通信系统中最重要的组成部分，是光波的传输媒介，其传播特性直接影响系统的通信质量。

在最初对光纤如何对光进行传导的实验中发现，所有将光纤用于通信的尝试都因信号刚传输几英尺就完全消失而失败。即随着传输距离的增加，信号将发生衰减和失真，信道的传输特性是影响光纤通信系统性能的决定因素。光纤的主要传输特性是损耗和色散。光纤的传输损耗特性用衰减系数表示，与光线中的杂质浓度和光波频率等因素有关。

## 三、 单模光纤的特征参数

单模光纤的常用特征参数：衰减系数、截止波长、模场直径

### 1. 衰减系数 $\alpha$

衰减量的大小通常用单位长度的衰减，即衰减系数  $\alpha$  表示，定义为

$$\alpha = 10/L \lg (P_i/P_o) \quad (\text{dB/km})$$

式中  $L$ ——光纤长度，单位 km

$P_i$ ——输入光纤的光功率  
 $P_0$ ——光纤的输出光功率。

## 2.截止波长 $\lambda_c$

截止波长是单模光纤所特有的参量，也是单模光纤最基本的参数，通常可以用来判断光纤中是否为单模工作方式。截止波长  $\lambda_c$  的含义是，能使光纤实现单模传输的最小工作光波波长。也就是说，尽管其它条件皆满足，但如果光波波长不大于单模光纤的截止波长，仍不可能实现单模传输。要保证单模传输，光纤的归一化频率  $V$  就要足够小，当  $V$  减小到高次模 LP<sub>11</sub> 的截止频率 2.40483 时，高次模 LP<sub>11</sub> 正好截止，光纤中只传输基模。单模光纤工作波长要大于截止波长，截止波长的典型值大于 1260nm。

## 3.场模直径 $d$

场模直径是衡量基模场强在光纤横截面内特定分布的约束光功率的物理量。对于阶跃型单模光纤，基模 HE<sub>11</sub> 场强在光纤截面的分布近似高斯分布。通常将纤芯中场分布曲线最大值的  $1/e$  处所对应的宽度定义为场模直径。ITU-T 规定，在 1.31  $\mu\text{m}$  波长上，场模直径的标称值在 9~10  $\mu\text{m}$ ，容差为  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

## 四、阶跃型折射率单模光纤的衰减特性分析

单模光纤是在给定的工作波长情况下，只传输基模的光纤。在阶跃折射率单模光纤中只传输 HE<sub>11</sub> 模。由于单模光纤只传输基模，无模式色散，因此，其频带宽，非常适合高速率、远距离传输。

在行一根光纤中发射光进行信息传输时，衰减是指由除了开始没有满足全反射条件外的原因所造成的能量损耗。造成光纤衰减主要有吸收衰减和散射衰减。吸收衰减是因为材料吸收而导致部分光功率变成热量而使光功率减少。散射衰减主要来自纤芯折射率的不均匀性、芯包边界边界的不规则、宏弯损耗以及输入输出之间的耦合损耗。一般的散射衰减包括宏弯损耗和微弯损耗，一般在实际应用中只标明宏弯损耗，将微弯损耗计算在总衰减中。

一般光纤损耗 (Loss) 定义为光纤输出端功率  $P_{out}$  与发射到光纤时的功率  $P_{in}$  的比值。

$$\text{Loss} = P_{out} / P_{in}$$

式中功率以 W 为单位。在通信技术中常用分贝 (dB) 来测量衰减，上式是总衰减的计算公式，衰减显然是和光纤的长度 L 成正比。光纤通信技术还有一个定义单位衰减公式

$$A(\text{dB/km}) = \text{Loss}(\text{dB}) / \text{光纤长度}(\text{km})$$

A (dB/km) 被称为衰减，是光纤最重要的特征之一，有时也被称为光缆损耗因子。

### 1、散射

在光纤的加工制造过程中，高透明度的光纤中不会有微粒杂质，但是可能存在折射率的细微变化。这种细微变化会被传输的光视为光阻碍，导致光的初始方向发生改变。光离开纤芯方向造成光散射损耗 (瑞利色散)。一般光纤散射也称为内部损耗，指一束以小于或者等于临界角的方向进行传播的光在遇到障碍物后会改变其方向。散射效应破坏了在纤芯包层边界保持全内反射的条件，部分光穿出纤芯，从而造成传输功率的损耗。这种损耗对硅制单模光纤的最小衰减加以绝对的限制。。

### 2、阶跃折射率光纤的弯曲损耗

弯曲损耗是单模光纤和多模光纤的一个主要区别，两类损耗均由纤芯模场限制决定。纤芯限制模场越紧，弯曲损耗就越小。

### (1) 宏弯损耗

单模光纤要比多模光纤对弯曲更敏感。光纤的弯曲会造成高斯曲线的中心偏移到包层的外侧，从而造成模场的重新分布，于是曲线就不再是高斯曲线。结果在包层外侧出现较长的“尾巴”，即中心偏移。

为了使偏离光纤中心的光传播更长的距离，该部分的尾巴必须以比光束其他部分更快的速度传播。偏离中心越大，它的速度也就应该越快。偏离光纤中心的光信号的速度就必须大于光速，这就意味尾巴要损耗掉，所以，光束功率会损耗掉一部分，衰减将会增长。在高斯模型中，当模场直径 MFD 比较大的时候宏弯损耗也较大。因为 MFD 依赖波长，所以宏弯损耗也依赖波长。波长越短场模直径越小，单模光纤的宏弯敏感性也就越小。还有，工作波长越长（在 1600nm 范围内），光纤所经历的衰减就越小。所以，一个单模光纤中的宏弯损耗随着弯曲半径的减少和工作波长的增加而增长。

### (2) 微弯损耗

单模光纤中微弯损耗是由于光纤的中心轴线围绕理论笔直的位置所发生的微小变化而产生的。在单模光纤中，对微弯损耗的敏感性随着波长的增加有所增长，原因在于较长的波长会使 MFD 增加，导致更多的功率辐射到纤芯外面。产生这些中心轴线的微小变化在于制造光缆的工程中施加在光纤上的压力和热力的影响，同时，微弯损耗随着温度和热应力的变化而变化。

## 3、吸收

在光纤传输中，如果光（光子流）所拥有的频率具有的能量等于材料的能级距离，这种光会被材料吸收。这种吸收导致光功率的损耗，而减少损耗可以通过改变光的频率或改善材料。材料的主要吸收波峰在 945nm、1240nm、1380nm 处。在实际应用中，改善材料的方法已经达到极限，我们只能通过改变光的频率。符合需求的光波长有三个吸收较小的区域，分别位于 850nm 附近，1300nm 附近和 1500nm 附近，这三个区域被称为透明窗口。

## 4、其他衰减因素

单模光纤存在模内色散，即存在于一个模式中的色散，这也是单模光纤中主要带宽的限制因素。产生模内色散的主要因素有两个：色度色散和偏振模式色散。

凹陷包层折射可能发生功率泄露，原因是包层外部的折射率比包层内部的折射率要高。改善此问题的方法是，凹陷包层的工作波长应该在截止波长和某个更高值之间进行选择。

## 五、光纤的设计趋势

现在的光线设计根据光纤的特性，光纤的发展趋势包括：继续改善已制成的光纤的特性；研制具有内置色散补偿能力的新型光纤；进一步加强光纤的有效区域，使更多的功率得到发射而不引起非线性效应；研制专用光纤，例如 PM 光纤、具有超低弯曲敏感性的光纤、具有大数值孔径的光纤、具有特定截止波长的光纤等。

### 参考文献：

- 【1】 丰乐平 张成良 通信工程丛书 [M, 人民邮电出版社 2006]
- 【2】 高建平 光纤通信 [M, 西北工业大学出版社 2005]
- 【3】 李海 宋元胜 光纤通信原理及应用 [M, 中国水利水电出版社 2005]

- 【4】 徐公权 段鲲 陈亚华 廖光裕等译 光纤通信技术[M, 机械工业出版社 2002]
- 【5】 李玲等 光纤通信[M, 人民邮电出版社 1995]