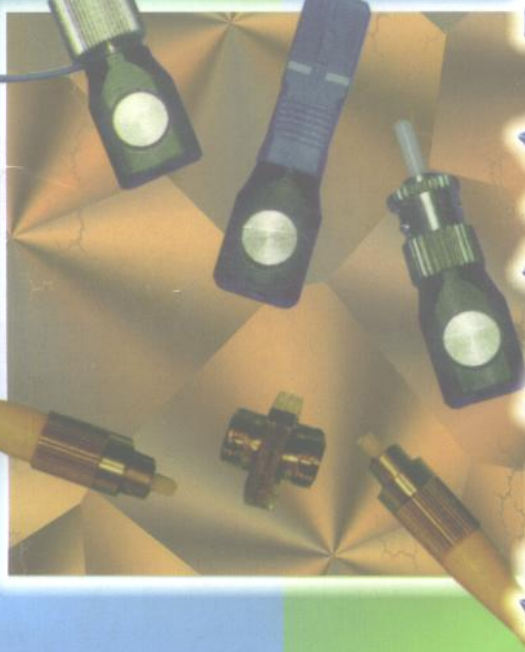


光无源器件

林学煌等 编著



人民邮电出版社



73.4614
321

光无源器件

林学煌等 编著



人民邮电出版社

9810080

D035/04

内 容 提 要

光无源器件是光纤通信设备的重要组成部分,也是其它光纤应用领域不可缺少的元器件。本书对光无源器件的基本原理、制造工艺、测试方法和实际应用作了详细的叙述;对当今光无源器件的最新成果作了全面的介绍;对今后的发展方向作了深入分析和探讨。

书中对光纤连接器、光衰减器、光耦合器、光波分复用器、光隔离器、光开关、光调制器进行了重点介绍。这些器件有些已大量用于光纤通信系统,有些将逐步用于光纤通信系统。对于这些器件,书中除阐述其原理之外,还重点论述了它们的内部结构。并介绍了关键零部件的设计机理、材料选用原则以及加工工艺。对器件的国际和国家标准也作了介绍。相信将有助于读者正确地选用器件、合理地使用器件。

本书适合从事光纤通信和光纤传感的科研院所、设计部门、工程施工单位和生产企业的技术人员参考,也适合大专院校通信专业的师生作教材之用。

光无源器件

◆ 编 著: 林学煌等

责任编辑: 梁 凝

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京崇文区夕照寺街14号

北京顺义振华印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 850×1168 1/32

印张: 7.875

字数: 204千字

1998年4月第1版

印数: 1—3 000册

1998年4月北京第1次印刷

ISBN 7-115-06767-8/TN · 1268

定价: 12.00 元

0000166

序

光无源器件是光纤通信设备的重要组成部分,也是光纤传感和其它光纤应用领域不可缺少的光器件。在光纤通信向大容量、高速率发展的今天,光无源器件的重要性将更加突出。光无源器件和有源器件是光通信系统的基础,更是向前发展的推动力。努力研制、开发新的无源器件和有源器件是我国今后光通信产业发展的重点之一。

世界上各发达国家和许多发展中国家,都在不断地开发各种光无源器件和建立相关产业;国际标准化组织已经或正在制定光无源器件的各种技术标准。近年来,新材料、新工艺、新产品在不断涌现。这些都预示着光无源器件正面临一个大发展时期。在这种情况下,《光无源器件》一书的出版是很有意义的。

我国的光无源器件研究始于70年代。近10年来发展十分迅速,产品成龙配套,并形成一定的规模产业,为我国光通信事业作出了重大贡献。本书的作者都是多年从事光无源器件科研、开发、生产的技术人员。在编写过程中,他们不仅总结了当今光无源器件的技术成果,而且对今后的发展方向作出了客观的预测。本书是一本内容丰富、论证严谨、理论结合实际的文献,也是我国在光无源器件方面的第一部专著,对从事光通信研究、生产和应用的科技人员具有较高的参考价值。

《光无源器件》的出版必将有力地推动光无源器件科研和生产的发展!

赵梓森

一九九七年四月八日

前 言

近年来,光纤通信发展非常迅速,应用日渐广泛。作为光纤通信设备重要组成部分的光无源器件,也取得了长足的进步,并逐步形成了规模产业。随着信息高速公路的启动,不久的将来,光纤将到路边、进入家庭。对光无源器件的需求也将与日俱增。为了促进我国光通信事业的发展,为了介绍光无源器件的最新成果,我们编写了这本《光无源器件》,奉献给读者,希望能帮助读者增加对光无源器件的了解。

谈起光无源器件,不禁使人联想起电无源器件,如接插件、开关、电阻、电容等等。光无源器件与电无源器件确有相似之处,前者是为光路服务的,后者是为电路服务的。光无源器件也有类似的光纤连接器、光开关、光衰减器、光耦合器等器件。但是在深入了解这两类器件之后,会发现他们之间有着本质的区别。

光无源器件是一种光学元器件。其工艺原理遵守光学的基本理论,即光线理论和电磁波理论,各项技术指标、各种计算公式和各种测试方法与纤维光学、集成光学息息相关。了解了这一点之后,就很容易理解光无源器件与电无源器件的本质区别了。

光无源器件的制作工艺特别复杂,涉及到许多不同的工艺技术。每一种光无源器件的制作工艺又各不相同,自成体系。这些工艺技术涉及到精密机械加工、成型工艺、精密光学加工、激光加工以及半导体工艺。每一种光无源器件的制作往往涉及多项高、精、尖工艺技术。要发展我国光无源器件产业,使之在世界光通信市场上占有一席之地,了解、掌握进而利用这些工艺技术是发展光无源器件产业的必要条件。器件的优劣、性能指标的好坏与工艺技术密切相关。寻求更新更先进的工艺技术,是发展光无源器件的重要课题,也是推动光纤通

信事业向前发展的关键之一。

光无源器件是一门新兴的、不断发展的学科。光纤通信的发展呼唤着功能更全、指标更先进的光无源器件不断涌现；一种新型器件的出现往往会有力地促进光纤通信的进步，有时甚至使其跃上一个新的台阶。光纤通信系统对光无源器件的期望越来越大，器件的发展对系统的影响越来越深。除此之外，光无源器件在光纤传感和其它光纤应用领域也大有用武之地。

由此可见，在信息技术大发展的今天，无论是光无源器件的使用者、生产者和研制者都需要增加对器件的认识和了解。本书的出版希望能在这方面对读者有所帮助。

本书对每一种光无源器件的原理、作用、制作工艺都作了较为详细的描述，对光无源器件的发展趋势作了尽可能客观的展望。书中对光无源器件列举了一些应用实例，以增加读者对实际应用的了解。

书中重点论述了下列几种光无源器件：

- (1) 光纤连接技术—各种连接器系列
- (2) 光信号衰减技术—各种光衰减器系列
- (3) 光信号功率分配技术—各种光耦合器系列
- (4) 光信号波长分配技术—各种光波分复用器系列
- (5) 回返光隔离技术—各种光隔离器
- (6) 光信号开关技术—各种光开关
- (7) 光信号调制技术—相位调制器和强度调制器

同时，还对光无源器件发展过程中，贯穿始终的几条主线加以论述。即

- (1) 纤维光学和集成光学应该共同发展，互为补充。
- (2) 分立元件和集成化器件将长期共存，但发展趋势是集成化。
- (3) 光线理论和电磁波理论是构成光无源器件的理论基础。
- (4) 高、精、尖的加工技术是制作光无源器件的基本保证。要发展光无源器件，必须加强工艺技术的研制。

光无源器件发展很快，在光纤通信和其它光纤应用领域中的地

位越来越重要。各发达国家和某些发展中国家都非常重视它的研制与开发,投入巨资建立研制机构和生产工艺,迅速建立起较大规模的产业。

我国光无源器件的研制近年来取得了长足的进步,开发出不少新的器件,为光纤通信工程提供了大量的产品,为光通信事业作出了巨大的贡献。在产业方面也有很大的进展,已建立起初具规模的产业基地,为今后的发展打下了良好的基础。但同时应该看到,我国的研制水平和产业规模与世界先进国家相比,还有不小差距,这是需要努力赶上的。

在今天这个信息社会里,信息量增长的速度愈来愈快,对通信容量的要求越来越大,网络覆盖的区域越来越广。这就要求光无源器件跟上发展的步伐,研制出性能更好、功能更多的光无源器件。在光纤进入家庭的同时,这些新的器件也将进入千家万户。可以预见,光无源器件将迎来一个光辉灿烂的大发展时期。

本书共分8章,其中第一章、第二章、第八章以及前言由林学煌同志编写;第三章和第六章由方罗珍、姚建两同志合写;第四章由王青林同志编写;第五章由刘水华同志编写;第七章由金正旺同志编写。

在编写过程中,曾得到许多同志的帮助。如工程院院士赵梓森同志在百忙中抽时间审阅并给予指导;潘孝先、吴仲君等同志提供了许多宝贵的资料。这些同志都非常支持和关心本书的出版,在此深表敬意和感谢!

由于光无源器件发展很快,涉及的知识面很广,再加上编写时间比较仓促,书中错误和疏漏之处在所难免,希望读者批评指正。

作 者

1997年5月12于武汉

目 录

第一章 光纤活动连接器	1
1.1 基本原理和结构	1
1.2 光纤活动连接器的核心部件.....	17
1.3 光纤(缆)活动连接器的组成部分.....	20
1.4 常用的品种、型号、规格和外形尺寸.....	23
1.5 光纤活动连接器的测试方法.....	32
1.6 今后发展方向.....	39
第二章 固定连接器	43
2.1 基本原理和结构.....	43
2.2 光纤熔接机.....	44
2.3 V形槽固定接头	58
2.4 毛细管固定接头.....	63
2.5 套管式固定接头.....	67
2.6 今后的发展方向.....	68
第三章 光衰减器	70
3.1 光衰减器的作用和工作原理.....	70
3.2 光衰减器的性能及测试.....	82
3.3 光衰减器的分类及性能指标.....	88
3.4 常用光衰减器的品种、型号、规格和外形.....	90
3.5 光衰减器的应用及发展.....	96
第四章 无源光耦合器件	99
4.1 概述.....	99
4.2 熔融拉锥型全光纤耦合器	103
4.3 波导型光耦合器	118

4.4	耦合器前景展望	123
第五章	光波分复用器	125
5.1	光波分复用器的工作原理和光学特性	125
5.2	光波分复用器的制造方法	128
5.3	光波分复用器的应用领域和应用实例	139
5.4	光波分复用器的型号、规格和技术指标	143
5.5	光波分复用器的发展方向	145
第六章	光隔离器	147
6.1	单模光纤准直器、偏振器及其它光隔离器中使用的光学元件	147
6.2	光隔离器的作用和工作原理	155
6.3	光隔离器的性能及指标测试	164
6.4	光隔离器的品种、规格、型号和技术指标	191
6.5	光隔离器的应用及发展	194
第七章	光开关	200
7.1	光开关的特性参数	201
7.2	机械式光开关	203
7.3	非机械式光开关	210
7.4	光开关的类型及其用途	221
第八章	无源器件的发展方向之一——集成光学	229
8.1	集成光学	229
8.2	光波导的结构形式	230
8.3	光波导所用的衬底材料	235
8.4	集成光学的工艺技术	238

第一章 光纤活动连接器

光纤(缆)活动连接器是实现光纤(缆)之间活动连接的无源光器件,它还具有将光纤(缆)与有源器件、光纤(缆)与其它无源器件、光纤(缆)与系统和仪表进行活动连接的功能。活动连接器伴随着光通信、光传感器的发展而发展,现在已经形成门类齐全、品种繁多的系列产品成为光通信、光传感器以及其它光纤应用领域中不可缺少的、应用最广的基础元件之一。

目前,光通信一方面朝着超高速、大容量、长距离的方向发展,另一方面又大力开发 CATV、光纤局域网和用户系统,使光纤到路边、进入家庭,这必然对活动连接器提出了多样化、高性能的要求。尤其在“信息高速公路”计划启动之后,活动连接器将面临更高的要求并具有更多的发展机遇。

活动连接器的发展要考虑三个方面:高技术性能、多规格品种和大规模产业。

1.1 基本原理和结构

1.1.1 光纤的结构和参数

光纤是由折射率不同的石英材料组成的细圆柱体。圆柱体的内层称为纤芯,外层称为包层。光线(或光信号)在纤芯内进行传输。

设纤芯的折射率为 n_1 ,包层的折射率为 n_2 。要使光线只在纤芯

内传输而不致通过包层逸出, 必须在纤芯与包层的界面处形成全反射的条件, 即要求满足:

$$n_1 > n_2 \quad (1.1)$$

图 1.1 显示了阶跃折射率光纤的结构。

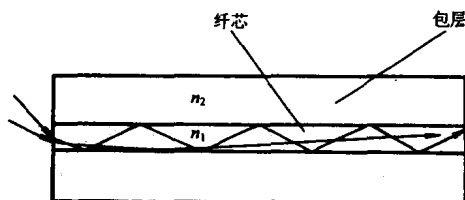


图 1.1 阶跃折射率光纤结构图

一般来讲, 不同种类、不同厂家的光纤, 其折射率的分布曲线是不完全一样的。但不管是何种光纤, 也不管其折射率如何分布, 纤芯的折射率 n_1 总是要大于包层的折射率 n_2 。

对于阶跃折射率光纤来讲, n_1 约为 1.46, n_2 约为 1.455。

图 1.2 为几种常见的光纤折射率的分布曲线。

除折射率之外, 光纤还有许多物理、化学方面的参数。这些参数在光通信、光传感的应用中, 都是需要考虑的。在制作连接器时, 也要考虑这些参数。但其中最重要的有如下几项:

1. 相对折射率 Δ

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (1.2)$$

对于多模光纤, $\Delta \approx 1\%$

对于单模光纤, $\Delta \approx 0.3\%$

2. 数值孔径 $N.A$

定义: 当光从空气入射到光纤输入端面时, 只有入射方向处于某一光锥内的光线在进入光纤之后才能留在纤芯内, 而从光锥之外入射的光线, 即使进入光纤, 也会从包层逸出。这个光锥半角的正弦, 称为光纤的数值孔径 $N.A$ 。即

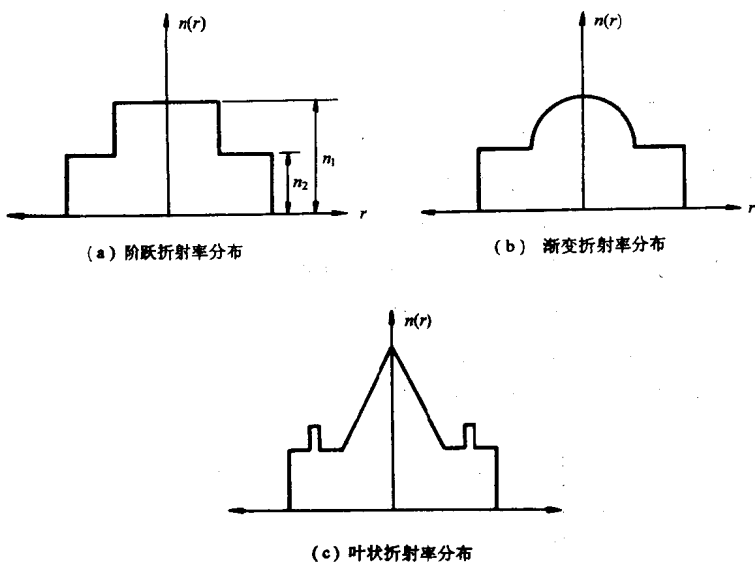


图 1.2 几种常见的折射率分布曲线

$$N.A = \sin \theta'_c$$

(1.3)

图 1.3 显示阶跃型光纤的接收角锥。

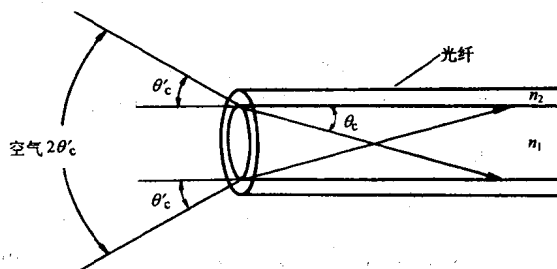


图 1.3 阶跃型光纤的接收角锥

对于阶跃折射率光纤, 根据定义可得数值孔径为:

$$N.A = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.4)$$

由于 $\Delta^2 \ll 2\Delta$, 经过推算之后, 可以得到

$$N.A = n_1(2\Delta)^{1/2} = [2n_1(n_1 - n_2)]^{1/2} \quad (1.5)$$

3. 衰减

峰值强度(光功率)为 I_0 的光脉冲从左端注入光纤纤芯, 光沿着光纤传播时, 其强度将按指数规律递减, 即

$$I(Z) = I_0 e^{-\alpha Z} \quad (1.6)$$

式中 I_0 —— 进入光纤纤芯 ($Z=0$ 处) 的初始光强

Z —— 沿光纤的纵向距离

α —— 光强衰减系数

光功率在光纤的衰减情况如图 1.4 所示。

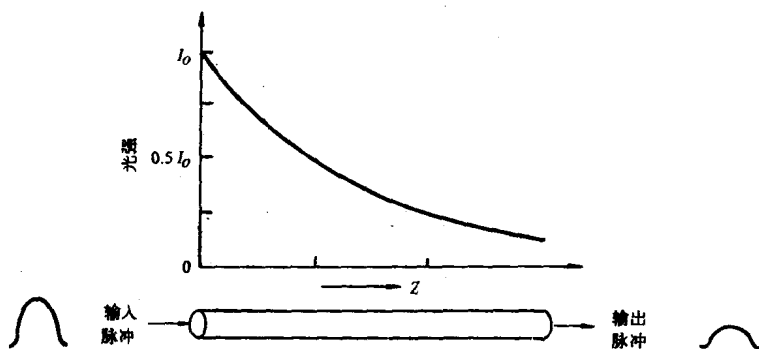


图 1.4 光强与距离的函数关系

光纤衰减率的定义: 光在光纤中每传播 1km, 光强损耗的分贝数定义为衰减率。即

$$\text{衰减率} = -10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB/km)} \quad (1.7)$$

若 Z 的单位用 km 表示, 则当 $Z=1\text{km}$ 时, 由式 1.6 可得

$$I(1) = I_0 e^{-\alpha} \quad (1.8)$$

将此式代入 1.7 式, 则得

$$\text{衰减率} = 4.3\alpha \text{ (dB/km)} \quad (1.9)$$

可见,衰减率只与衰减系数有关。

引起光衰减的原因有材料吸收、弯曲损耗和散射损耗等几种。限于篇幅,在这里不一一叙述的。目前,单模光纤的衰减率可以达到 0.4dB/km ,多模光纤的衰减率可以达到 0.5dB/km 的水平。

4. 模式

光线理论是光在有限介质中传播的一种近似的表达方法。只有在光波长与波导横截面尺寸相比较小的时候,这种理论才能适用。氦氖激光器的光波长是 $0.63\mu\text{m}$,光线理论能很好地应用于芯径大于 $25\mu\text{m}$ 的光纤。但对于芯径为 $4\mu\text{m}$ 的光纤来讲,光线理论的近似性较差。此时用电磁波的理论来表述光的传播更为合适。

根据麦克斯韦方程,当引入纤芯—包层界面处的边界条件时,只能存在波动方程的特定(离散)解,这些特定解代表了许多离散的沿波导轴线传播的波,每个波都具有不同的振幅和速度,都代表了一种模式。

正因为如此,光纤可以分为单模光纤和多模光纤。制作这两种光纤连接器时,其加工精度,测试方法将有所区别。

5. 光纤的几何和机械参数

(1) 纤芯直径:这是制作连接器要考虑的重要指标。

一般要求单模为 $9\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$;多模为 $50\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ 。

(2) 纤芯不圆度:小于 $0.5\mu\text{m}$ 。

(3) 包层直径:一般选用 $125\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ 。

(4) 包层不圆度:小于 2% 。

(5) 同轴度:是指纤芯中轴线对包层外圆柱面的同轴度,要求小于 $1\mu\text{m}$ 。

(6) 抗拉强度:制作连接器的光纤,其抗拉强度要求高一些,应大于 0.5kg 。

1.1.2 连接器的重要指标

评价一个连接器的指标很多,但最重要的指标有 4 个,即插入损

耗、回波损耗、重复性和互换性。

1. 插入损耗

插入损耗是指光纤中的光信号通过活动连接器之后,其输出光功率相对输入光功率的比率的分贝数,表达式为:

$$I_L = -10 \log \frac{P_1}{P_0} \text{ (dB)} \quad (1.10)$$

其中 P_0 ——输入端的光功率

P_1 ——输出端的光功率

对于多模光纤连接器来讲,注入的光功率应当经过稳模器,滤去高次模,使光纤中的模式为稳态分布,这样才能准确地衡量连接器的插入损耗。

插入损耗愈小愈好。

2. 回波损耗

回波损耗又称为后向反射损耗。它是指在光纤连接处,后向反射光相对输入光的比率的分贝数,表达式为

$$R_L = -10 \log \frac{P_r}{P_0} \text{ (dB)} \quad (1.11)$$

P_0 ——输入光功率

P_r ——后向反射光功率

回波损耗愈大愈好,以减少反射光对光源和系统的影响。

3. 重复性和互换性

重复性是指光纤(缆)活动连接器多次插拔后插入损耗的变化,用 dB 表示。互换性是指连接器各部件互换时插入损耗的变化,也用 dB 表示。这两项指标可以考核连接器结构设计和加工工艺的合理性,也是表明连接器实用化的重要标志。连接器的部件一般分为跳线和转换器两部分(下述)。互换性是指这两种部件的任意互换或有条件的互换。

1.1.3 影响插入损耗的各种因素

光纤连接时,由于光纤纤芯直径、数值孔径、折射率分布的差异

以及横向错位、角度倾斜、端面间隙、端面形状、端面光洁度等因素的影响,都会产生连接损耗。下面分别予以探讨。

1. 纤芯错位损耗

纤芯错位如图 1.5 所示。

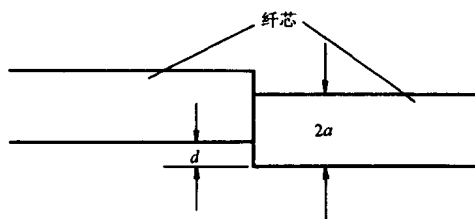


图 1.5 纤芯错位

由于纤芯横向错位引起的损耗叫错位损耗。它是产生连接损耗的重要原因。渐变型折射率多模光纤在模式稳态分布时,其错位损耗用下式表示:

$$I_{Ld} = -10 \log[1 - 2.35(d/a)^2] \quad (1.12)$$

单模光纤的传输模为高斯分布,其错位损耗由下式表示:

$$I_{Ld} = -10 \log e^{-(d/\omega)^2} \quad (1.13)$$

其中:

$$\omega = \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \right) a$$

$$V = 2\pi a n_1 \sqrt{2\Delta/\lambda}$$

Δ —相对折射率

λ —传输光波长

n_1 —纤芯折射率

图 1.6 表示错位与损耗之间的关系曲线。

图 1.6 中多模光纤 $2a=50\mu\text{m}$, $\Delta=1\%$; 单模光纤 $2a=10\mu\text{m}$, $\Delta=0.3\%$ 。图中显示,若要求错位损耗小于 0.1dB,对于多模渐变型光纤在模式稳态分布时,横向错位应小于 $3\mu\text{m}$;对于单模光纤,横向错

位应小于 $0.8\mu\text{m}$ 。

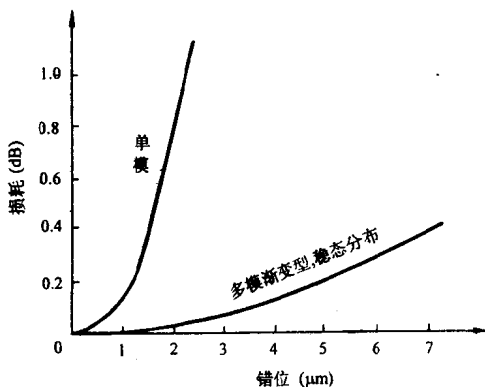


图 1.6 错位损耗

通过计算也可以得出类似的结果。即取错位损耗为 0.1dB ，代入公式(1.12)，可以得出多模渐变型光纤，在模式稳态分布状态下的横向错位：

$$d = 2.46\mu\text{m}$$

同样，利用公式(1.13)，对单模光纤当错位损耗取 0.1dB ，并假定 $a = 5\mu\text{m}$ ， $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ 横向错位

$$d = 0.72\mu\text{m}$$

大量的生产实践结果与理论计算基本一致。

2. 光纤倾斜损耗

在光纤连接处，由于两光纤轴线的角度倾斜而引起光功率的损耗称为倾斜损耗，如图 1.7 所示。

多模渐变型折射率光纤，在模式稳态分布时，倾斜损耗为：

$$I_{L\theta} = -10\log(1 - 1.68\theta) \quad (1.14)$$

单模光纤的倾斜损耗为

$$I_{L\theta} = -10\log e - (\pi n_2 \omega \theta / \lambda)^2 \quad (1.15)$$

其中 ω ——与式 1.13 相同

λ ——波长

n_2 ——包层折射率