

光导纤维通信 中的光耦合

虞 丽 生 编

人 民 邮 电 出 版

光导纤维通信中的光耦合

虞丽生 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书主要介绍半导体激光器、发光二极管与光导纤维之间以及光导纤维与光导纤维之间的耦合问题。书中简要地分析了它们的原理并介绍了一些连接装置的实例。最后对光定向耦合器也作了简要的介绍。

光导纤维通信中的光耦合

虞丽生 编

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1979年4月第 一 版

印张：2 20/32页数：42 1979年4月河北第一次印刷

字数：58千字 印数：1—12,500册

统一书号：15045·总2290—有5117

定价：0.23元

前 言

光导纤维通信具有信息传送容量大、距离远、抗干扰性能强及设备结构轻便等优点，是一种很有前途的通信方式，近几年来在国内外普遍受到重视，发展得十分迅速。由于光导纤维传光损耗的降低，使得光导纤维通信系统将更快地进入实用的阶段。

在光导纤维通信系统中，除了要有合乎要求的光源、光导纤维和接收元件之外，还要解决各部分之间的光耦合问题，它是光导纤维通信进入实际应用必须解决的重要问题之一，近年来国内外在这方面都进行了不少研究工作，取得了一定的进展。这本小册子主要向读者介绍光耦合的基本概念，并参考最近三、四年来国内外关于光耦合研究工作的结果，加以系统整理。但由于这项工作还在不断发展，介绍得还不全面，不深入，仅供从事这方面工作的同志参考，并请给以批评指正。

目 录

一、概述	(1)
§ 1.1 什么是光导纤维通信	(1)
§ 1.2 光导纤维通信的主要组成部份	(2)
§ 1.3 光耦合在光导纤维通信中的作用	(6)
二、半导体双异质结激光器与光导纤维的耦合	(7)
§ 2.1 光导纤维的特性	(7)
§ 2.2 半导体双异质结激光器的特性	(12)
§ 2.3 直接耦合, 耦合效率的理论极限	(15)
§ 2.4 透镜耦合	(21)
1. 端面球透镜耦合	(22)
2. 柱透镜耦合	(25)
3. 圆锥形透镜耦合	(29)
4. 凸透镜耦合	(31)
5. 自聚焦透镜耦合	(33)
三、半导体发光二极管和光导纤维的耦合	(38)
§ 3.1 直接耦合	(38)
§ 3.2 透镜耦合	(41)
1. 光导纤维端面球透镜耦合	(42)
2. 球透镜耦合	(43)
3. 复透镜耦合及圆锥透镜耦合	(44)
4. 侧面出光发光二极管的耦合	(46)

四、光导纤维与光导纤维之间的耦合	(48)
§ 4.1 引起耦合损失的因素的分析	(48)
1. 轴偏离对耦合损失的影响	(49)
2. 光纤端面之间的间隙对耦合损失的影响	(50)
3. 光纤之间角度的倾斜对耦合损失的影响	(50)
4. 光纤端面的不完整性对耦合损失的影响	(51)
5. 不同种类光纤的耦合对耦合损失的影响	(53)
§ 4.2 实际的光纤连接装置	(55)
1. 固定连接——焊接	(55)
2. 半固定连接——粘接	(56)
3. 可拆卸的活动连接器	(58)
五、接收器件与光导纤维的耦合及光定向耦合器	(62)
§ 5.1 接收器件与光导纤维的耦合	(62)
§ 5.2 光定向耦合器	(63)
1. “双圆锥形”光耦合器	(64)
2. “反射膜式”光耦合器	(65)
3. “自聚焦透镜式”光耦合器	(65)
附录一 光导纤维端面的处理	(71)
附录二 光导纤维顶端透镜的制备	(72)

一、概 述

§ 1.1 什么是光导纤维通信

“通信”这个名词是大家所熟悉的，通俗地讲就是传递消息。为人们所熟知的电报、电话、电视等就是利用电波来传递声音、图象、数据等信息的通信手段。顾名思义，“光通信”就是利用光波来传递信息。

“光”作为通信的手段，对人们来说并不是什么生疏的东西，用“光”来传递“消息”远在几千年以前就已经有了。万里长城上的烽火台就是利用狼烟和火光来报告敌人入侵的信息。灯光在黑夜中发出明暗的信号也可以做为互相联络的手段。当然，用这种办法所能传达的消息是十分简单和非常有限的。

自从“电”发明了以后，通过“电”能把声音和图象等以有线和无线的方式直接传给对方，通信的手段就进步得多了，而且成为现代生活中必不可少的一部份内容。

近几十年来科学飞速地发展，到了二十世纪六十年代“激光”出现了。因为激光的亮度特别高，方向性又好，所以传送的距离远，这就有了利用“光”来直接传递声音、图像等信息的可能性，于是“光通信”就在更新、更高的基础上发展起来了。

光通信和电通信一样也可分为“有线”的和“无线”的两

种。六十年代就有人进行了大气传输的激光通信试验，也取得了一些成绩。但是，由于这种传输受天气的影响很大，另外在“发”和“收”两端之间不能有障碍物、瞄准困难。由于受到这些条件的限制，因而适用范围不广，进展不大。七十年代初，低损耗的石英光导纤维（简称光纤）问世后，以光纤做为传光导体的“有线”光通信的研究工作发展很快，将激光引进了通信领域，这就是所谓的光导纤维通信（简称光纤通信）〔1〕。

光纤通信和电通信相比有许多明显的优点：如抗电磁干扰性能强，保密性能更好，频带宽，通信容量更大，传输质量提高等，所以光纤通信很快为人们所重视。光纤通信在市内电话和长途电话系统中；电力、铁路、输油输气管路的通信和控制系统中；飞机、轮船、导弹内部的信息传送系统中都可以应用。

近几年来，以实用化作为目标的光纤通信的研究工作在许多国家进展得很迅速。在日本和美国，以及其他一些欧洲国家中都先后敷设了比较完整的试验线路进行信息传输的研究。在光纤，光源，接收器和耦合连接技术上作了许多工作，解决了一些关键问题。光纤通信不久就可许多方面部份地代替其他通信方式而正式为国民经济服务。

§ 1.2 光导纤维通信的主要组成部份

光导纤维通信系统是怎样工作的呢？它包括那几个重要组成部份？都有些什么要求？下面我们以前码调制（PCM）多路电话的通信系统为例来作些简单的说明。它的方框图如图1.1所示。

各路电话来的声音都进入脉码调制端机（PCM）进行编

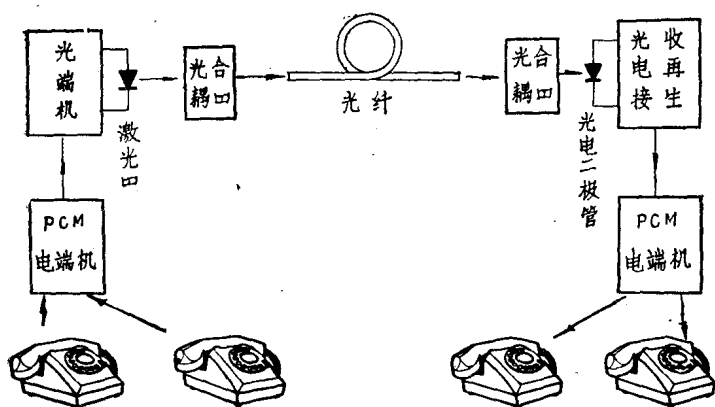


图 1.1 PCM多路电话光纤通信系统

码，然后送入光端机，经过放大等处理，驱动半导体激光器工作。激光器发出的调制光经过光耦合器被送入低损耗光纤中传输到对方。从光纤传来的光信号在收端再经光耦合器用半导体光电接收元件变成电信号，通过光端机均衡、放大等电路再生为原来发送的电信号，输入PCM端机中由译码等电路还原成声音分别送入各路电话中去。

这个通信系统和普通PCM电通信系统所不同的是传输信息的载波不再是“电波”而是“光波”，因而也就增加了三个新的主要组成部份——光源，光纤和光接收器。现在分别将这三部份的情况简单介绍如下：

(1)光源 适合于做光纤通信的光源目前有以下三种：

$GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ 双异质结激光器(DH)〔2〕——发光波长为 $8000\sim 9000\text{\AA}$ 。当外加电流达到阈值电流(一般阈值电流为 $150\sim 200mA$)它就发出激光。光功率一般都在 $10mW$ 以上，好的可达到 $80mW$ 。可以用电流对它进行直接调制，调制的最高数据率可达到 $800\sim 1000Mb/s$ 。器件的寿命可达到一万

小时以上，好的可达十万小时。对光纤通信来说，这种光源是最有前途的。

发光二极管 (LED) [3]——也是 $GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ 结构，但它的工作状态是自发辐射，不是激光。波长也在 $8000 \sim 9000 \text{ \AA}$ 之间。发光功率为 $5mW$ 左右。可以直接调制。它的优点是可靠耐用，寿命能很容易达到十万小时，甚至几十万小时。它的缺点是方向性不好；耦合效率比较低；中继距离比较短；调制速率较低。但在数据率 $100Mb/s$ 以下的较短距离的通信系统中它仍是很合适的光源。

小型固体激光器 (钇铝石榴石 $YAG:Nd$)——一般用发光二极管做为泵光源，它的发光波长是 $1.06\mu m$ ，可与石英光纤的低吸收区匹配得更好一些。这种激光器的功率为数 mW ，方向性较强。它的缺点是不能直接调制，要用调制晶体，体积较大，使用不太方便。

(2) 光纤 纯的 SiO_2 石英材料对光的吸收系数是很小的，用它经过特殊提纯后便可拉制成低损耗光纤。

光在光纤中的传输损耗与波长有关，其关系如图 1.2 所示 [4]。

$GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ 双异质结光源的发光波长处于光纤损耗比较小的区域，这对光纤通信是有利的。目前通信用的光纤已可做到每公里损耗 $3 \sim 5dB$ ，好的可达到 $1dB$ 以下。

光纤的外径一般都在 $100 \sim 150\mu m$ 之间，在这样的细丝外面涂上塑料敷层虽可起一定的保护作用，但机械强度还是很差。在实用中将 2 根到 8 根或更多根光纤组装成光缆，这样在敷设时就和电缆一样方便了。图 1.3 就是这种光缆的两个例子 [5][6]。目前成缆的方式很多，但原则上大同小异。

(3) 高灵敏度接收元件 一般使用硅 PIN 管或硅雪崩光

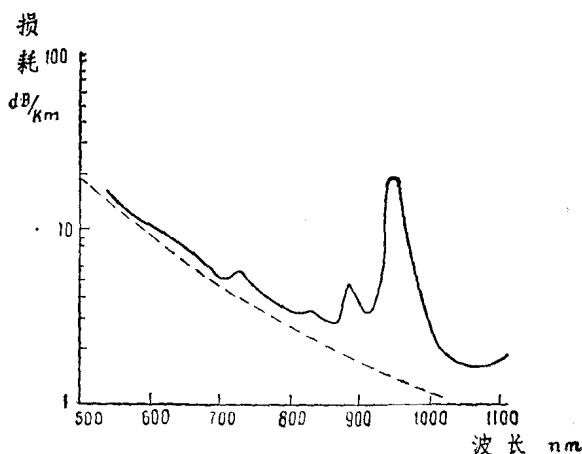


图 1.2 石英光纤的传输损耗与波长的关系

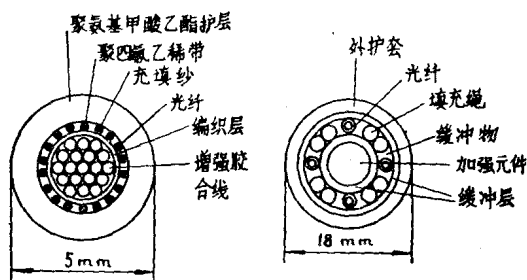


图 1.3 光导纤维成缆两例

电二极管 (APD) 接收光信号。它们的波长响应范围正好和 $GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ 双异质结发光器件相匹配。它们的灵敏度都比较高, PIN 管可达 $10^{-7} \sim 10^{-8} W$, APD 管可达 $10^{-8} \sim 10^{-9} W$ 。响应时间也较快, PIN 管可达 $1 ns$, APD 管可达 $1 ns$ 以下。一般在调制速率为 $800 \sim 1000 Mb/s$ 以下的通信系统中都可以使用。以 PCM 为例, 在数码率为 $8.448 Mb/s$ 时,

整个接收系统的灵敏度一般可达到 $50dBm$ 左右，最好的可达到 $60dBm$ 。

§ 1.3 光耦合在光导纤维通信中的作用

仅有以上三个主要部份还不足以组成完整的传输光的系统。因为光纤的芯径一般都很细，只有几个微米到 100 微米左右，怎样才能把光源发出的光功率最大限度地输送进光纤中去是一个比较复杂的问题，这就是所谓的光耦合。在研究光耦合问题时，需要了解光纤的接收特性和传输特性，以及光源发出的光功率的空间分布。在这个基础上还要考虑在光源和光纤之间放置透镜等光学元件时光传输情况发生的变化，设法使光源发出的光功率尽可能多地输送进光纤。除了光源和光纤的耦合之外，还要解决光纤和光纤之间以及光纤和接收元件连接起来时的光传输问题。

对光耦合的要求主要是使耦合损失愈小愈好；同时，在实际的通信系统中还要求做到使各部份的耦合连接简单方便。

光源发出的光功率是一定的，接收系统的灵敏度也是一定的，耦合接头处的损耗愈大，通信系统的传输距离就愈短。如果耦合损耗太大，则使通信系统不能工作。所以耦合连接问题是光导纤维通信实用化中必须解决的重要问题之一。

二、半导体双异质结激光器与 光导纤维的耦合

§ 2.1 光导纤维的特性

从传输特性来看, 光纤可分为单模和多模两种^{*}。单模光纤的芯很细, 一般直径在 $5\mu\text{m}$ 以下。光在单模光纤中的传输问题需用电磁波理论来分析。对单模光纤通信的研究还处在探索阶段。通常所说的比较成熟的光纤通信都是指多模的光纤。这种光纤的芯径比较大, 约为 $80\mu\text{m}$ 左右, 因而在真空中波长为 $0.85\mu\text{m}$ 的光在多模光纤中的传输可以用光线光学的方法来分析处理。

通信用的低损耗多模石英光纤在结构上可以分为两大类。一类是突变折射率型(或称阶梯型)光纤, 如图2.1(a)所示。它由内外两层折射率不同的石英材料组成, 芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 大。另一类是渐变折射率型(或称渐变型)光纤, 如图2.1(b)

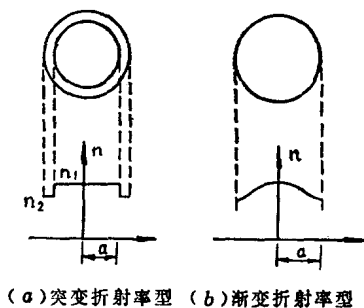


图 2.1 光纤的折射率分布

^{*} 光作为电磁波在光纤介质中传播, 它的电磁场在光纤中按一定的方式分布, 这称之为模式。单模光纤是指只允许一种电磁场分布方式存在的光纤。多模光纤是指允许许多种电磁场分布方式同时存在的光纤。

所示。它的折射率在径向是逐渐变化的，中心大，边上小。

有时为了拉制工艺的需要(例如用化学气相沉积法—CVD法拉制时)，上述两类光纤的最外面还有一个石英包层。

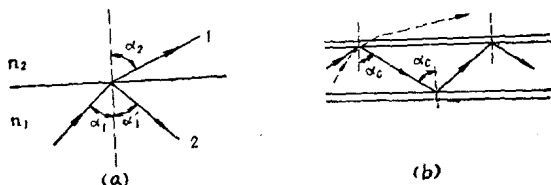


图 2.2 (a)光在介质界面上的反射和折射
(b)光在光纤中的传输

下面让我们来看一看，光是怎样在光纤中传播的。大家知道，光经过两个不同介质的界面时，要发生折射和反射，如图 2.2(a)所示。一束光从折射率为 n_1 的介质中以入射角 α_1 射向界面，一部份光透过界面进入折射率为 n_2 的介质中，出射角为 α_2 ；另一部份光在界面上反射回来，反射角为 α_1' 。它们的定量关系是：

$$\left. \begin{aligned} n_1 \sin \alpha_1 &= n_2 \sin \alpha_2 && \text{(折射定律)} \\ \alpha_1 &= \alpha_1' && \text{(反射定律)} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

当 $n_1 > n_2$ 时，应有 $\alpha_1 < \alpha_2$ 。如果光由折射率大的介质(n_1)射向折射率小的介质(n_2)，当入射角 α_1 增大到某一个 α_c 值时，有可能使出射角 $\alpha_2 = 90^\circ$ ，这就是说，光不能穿出两个介质的界面而完全反射了回来，这就是“全反射”原理。 α_c 称为全反射的临界角，它由两个介质的折射率决定，即

$$\alpha_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2) \quad (2.2)$$

光在光纤中的传输就是利用了这个原理。光在阶梯型光纤中的传输，如图 2.2(b)所示。那些入射角大于 α_c 的光线在芯

和包层的界面上将发生全反射。反射的光线仍以同样的角度向对面的界面入射。这样，它将在光纤的界面上反复的发生全反射，成“之”字形前进而达到传输的目的。发生全反射时，界面的反射损耗是很小的，一般反射率可达到 0.9995〔7〕，它比任何金属层的反射率都好，如反射性能最好的铝的反射率是 0.9。光在光纤中的传输损耗主要不是由反射损失造成的，而是由散射和光纤的吸收引起的。

由图 2.2(b) 可以看出，只有那些入射角大于 α_c 的光线才能在光纤中传输。而那些入射角小于 α_c 的光线将有很大一部份透射出光纤包层（如虚线所示），而剩下的那部份经过几次反射也都逐渐透出去而消失了。

用一个点光源照射光纤的平端面（见图 2.3 所示），从光源发出的光以入射角 θ 射向光纤端面，经过折射以后，以出射角 γ 射入光纤芯中。到达芯和包层的界面时的入射角为 α 。上面已经说过，光纤只允许那些 $\alpha > \alpha_c$ 的光线传播，所以，从光源发出的，能照射到光纤芯端面上进入光纤的光中只有一部份被光纤接收。这就是说，只有那些对光纤端面的入射角小于某

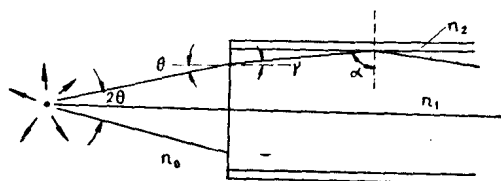


图 2.3 光纤的接收特性

一临界值 θ_c 的光才能被允许在光纤中传播。 θ_c 可由式 (2.2) 推导出来，由折射定律知道：

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \gamma \quad (2.3)$$

发生全反射时应有

$$\gamma_c = \frac{\pi}{2} - \alpha_c$$

代入式(2.3)中

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_c &= n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_c \right) \\ &= n_1 \cos \alpha_c \\ &= n_1 (1 - \sin^2 \alpha_c)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

由式(2.2)知道:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_c &= n_2 / n_1 \\ \text{则 } n_0 \sin \theta_c &= n_1 \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

一般来说, 光纤和光源都处于空气之中, $n_0 = 1$, 则有:

$$\sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

θ_c 称为光纤的接收角, 它由光纤内外层折射率决定。在讨论光纤的耦合问题时它是一个关键的参数。它的意义是: 无论光源发射的总功率有多大, 只有张角为 $2\theta_c$ 之内的光功率能被光纤所接收。我们称 $n_0 \sin \theta_c$ 为光纤的数值孔径 (NA)。一般都用数值孔径来标志光纤的接收性能。 θ_c 愈大, 光纤所能接收到的光愈多, 耦合效率就愈高。那么, 从耦合的角度来说应该把数值孔径做得愈大愈好; 但是, 通信还不能只考虑耦合的问题, 还要考虑脉冲信号在光纤中传输时的畸变问题。在图2.3中, 光源在同一时刻发出两束光, 一束沿光轴前进, 另一束沿全反射角前进, 则经过长度为 L 的光纤后, 这两束光不能同时到达终点, 因为沿光轴前进的光经过的距离短, 而沿全反射角前进的光经过的距离长, 也就是这两束光的光程*不同, 因而

*在光学中我们常常使用“光程”这一名词。大家知道, 光在真空中的传播速度为 $c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/S}$, 而在介质中的速度慢一些, 为 $\frac{c}{n}$, n 为介质的折射率。我们称光所走的距离 L 和折射率 n 的乘积 nL 为光程。光经过相同光程所需的时间是一样的。

到达终点的时间也不同。假如有一个矩形的光脉冲，如图2.4(a)所示，进入光纤入射端，则从出射端出来的光脉冲就变成图2.4(b)所示的样子，脉冲畸变了。对于一定的传输距离， α_c 角愈小（也就是光纤接收角 θ_c 愈大）光程差就愈大，脉

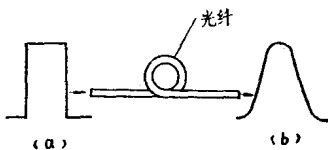


图 2.4 光纤传输中脉冲信号的畸变

冲畸变得愈厉害（而且， θ_c 值愈大，光纤的衰减也愈大）。由于脉冲信号的畸变使通信系统的调制速率受到限制，对于信息容量大的系统来说，不能让信号过分畸变，所以光纤的数值孔径就不能太大。目前在数百兆比/秒的通信系统中用的光纤的数值孔径一般都在 $NA=0.14$ 左右。由式(2.6)可以看出，为了满足 $NA=0.14$ 的条件，要求包层和芯的折射率相差很小，大约在0.5%左右（一般光纤芯的折射率为 $n=1.45$ 左右），这时式(2.5)可以变为：

$$n_0 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = [(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)]^{\frac{1}{2}} \approx [2n_1 \Delta n]^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

数值孔径是和光纤内外层折射率之差 Δn 的平方根成正比的。

对于渐变折射率型光纤，折射率随半径的变化可以写为[8]：

$$n(r) = n_1 [1 - \Delta n (r/a)^m] \quad (2.8)$$

其中 r 是径向坐标， a 是光纤芯半径， Δn 是光轴上的折射率 n_1 和最外层折射率之差， m 为正的指数。可以看出，当 $m=\infty$ 时，在 $r < a$ 处， $n(r) = n_1$ ；在 $r = a$ 处， $n(r) = n_1 - \Delta n$ ，这就是上述的突变折射率型的情况。当 $m=1$ 时，折射率的变化由中心向外层呈线性下降。当 $m=2$ 时，折射率由中心向外层呈抛物线型下降（所谓二次曲线型），这就是所谓的自聚焦