

● 顾贻仪 李国瑞 编著 叶培大 审

邮电高等学校教材

光纤通信系统

人民邮电出版社

前 言

本教材于一九八三年六月完成初稿，并对本科四年级学生（选修课）和研究生进行了讲授。在几年的教学和科研实践中，我们不断地总结科研成果和经验，广泛地收集有关资料，并听取了同行专家及学生对教材的有关意见。在此基础上，反复对教材进行了修改和补充，本书是第三次修改稿。

光纤通信是七十年代才开始发展起来的一项新技术，也是一项发展十分迅速的新技术。因此，本教材在讲述光纤通信的基本理论时，力图能反映光纤通信由短波长向长波长、由低速率向高速率、由多模向单模发展的趋势，反映光纤通信中的新技术，使读者能适应光纤通信迅速发展的形势的需要。例如，本书较系统地介绍了半导体激光器的瞬态性质，并根据此性质解决激光器高速调制中的一些问题。对高速光纤通信系统的设计及光纤通信中的新技术也作了介绍。

本书主要讲述光纤通信系统的基本原理，同时，对有关的工程、设计问题和具体电路也作了一些介绍。

本书涉及通信、物理、概率论及数理统计等多方面的基础知识。由于作者的理论水平有限，错误和不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

一九八八年十二月

目 录

绪论	(1)
第一章 光纤的传输理论	(4)
§ 1.1 光纤的基本性质	(4)
§ 1.2 介质平板波导	(19)
§ 1.3 阶跃折射率光纤的模式理论	(35)
§ 1.4 渐变折射率光纤的近似分析	(57)
§ 1.5 单模光纤	(73)
本章小结	(85)
习题	(87)
参考资料	(89)
第二章 光源和光调制	(91)
§ 2.1 激光原理的基础知识	(91)
§ 2.2 半导体激光器和发光二极管	(105)
§ 2.3 半导体激光器的模式性质	(119)
§ 2.4 半导体激光器的瞬态性质	(133)
§ 2.5 半导体激光器的自脉动现象	(149)
§ 2.6 半导体激光器的直接调制和光发射机	(159)
§ 2.7 光源的间接调制	(171)
本章小结	(188)
习题	(190)
参考资料	(194)
第三章 光接收机	(196)
§ 3.1 光电检测器	(197)
§ 3.2 放大器及其电路的噪声	(212)
§ 3.3 光电检测过程的统计性质及灵敏度的	

精确计算	(229)
§ 3.4 灵敏度计算的高斯近似法	(238)
§ 3.5 光接收机的均衡网络、AGC电路和 再生电路	(271)
本章小结	(289)
习题	(293)
参考资料	(295)
第四章 光纤通信系统	(297)
§ 4.1 光纤通信系统和数字网的概况	(297)
§ 4.2 光纤通信系统中的光耦合	(312)
§ 4.3 光纤通信系统的总体估计	(330)
§ 4.4 波分复用系统和复用器件	(343)
§ 4.5 相干光通信系统	(361)
§ 4.6 光纤的非线性效应及其对通信系统的 影响	(375)
本章小结	(388)
习题	(390)
参考资料	(393)
第五章 光纤通信测量技术	(395)
§ 5.1 光纤损耗的测量技术	(395)
§ 5.2 光纤色散的测量技术	(403)
§ 5.3 光接收机灵敏度和动态范围的测量方法	(417)
本章小结	(420)
习题	(421)
参考资料	(422)
附录一	(424)
附录二	(430)

绪 论

1970年，美国康宁玻璃公司研制出损耗为20dB/km的石英光纤，证明光纤作为未来光通信的传输媒质是大有希望的。同年，GaAlAs异质结半导体激光器实现了室温下连续工作，为光纤通信提供了理想的光源。从此，便开始了光纤通信迅速发展的时代。

从1970年至今仅十几年的时间，然而，光纤通信的发展速度远远超过了人们的预想。这首先表现在光纤的传输质量大大提高了。光纤的传输损耗逐年降低，到1972~1973年，在0.85 μ m光波段，光纤的传输损耗已下降到2dB/km左右。通过理论分析和实践摸索，人们发现，在较长波长区域光纤的传输损耗可以达到更小的值，经过科学家和工程技术人员的努力，很快在波长为1.3 μ m和1.55 μ m左右分别实现了损耗为0.5dB/km和0.2dB/km的极低损耗传输。

与光纤损耗逐年下降的同时，光纤的带宽不断增加。光纤的生产先是从带宽较窄的阶跃折射率光纤转向带宽较大的渐变折射率光纤。目前在国际上，色散极小、带宽高达几十GHz·km甚至上百GHz·km的单模光纤的成本已下降，因而得到广泛的应用。

新的传输方式、新系统的诞生和发展必然激励着新部件的发展。光纤通信的发展促进了半导体光源（GaAlAs和InGaAsP激光器及发光二极管）和光电检测器（Si、Ge、InGaAs光电二极管及雪崩光电二极管）等光电器件的发展，使之性能不断改善、寿命不断加长。反过来，光电器件的发展又给光纤通信创造了更为有利的条件，使之很快经历了研究和试验阶段而实现了商用生产，并不断地扩展其使用的领域。各种各样的光纤通信系统以及光纤数字通信网，如雨后春笋般已在世界各地建立起来，显示出光纤通信优越的性能及强大的竞争力。

目前，国际上光纤通信的发展趋势可概括为如下几点：

(1) 光纤通信已由工程量较小的市话通信的建设发展到工程量较大的长途干线的建设, 这样就更充分地发展了光纤传输容量大、损耗小、中继距离长的优点。

(2) 光纤通信已逐渐由开始使用的短波长 ($0.85\mu\text{m}$) 转向长波长 ($1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$), 由多模光纤转向单模光纤的应用。根据1985年有关资料的统计, 在世界各国正在建设的2万余公里的光纤通信系统中, 波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的单模光纤系统约占70%。多模系统约占10%, 而波长为 $0.85\mu\text{m}$ 的多模光纤系统仅占20%。

(3) 光纤通信日益向高速率、大容量、长中继距离发展。在1981年, CCITT曾建议以140Mb/s四次群系统作为大容量的标准系统, 但近年来系统速率已远远超过140Mb/s。日本和美国400Mb/s系统已实用化, 英国普来塞公司的560Mb/s的光纤通信系统也即将安装商用, 美国的贝尔系统已成功地在实验室内进行了2Gb/s、4Gb/s、8Gb/s及16Gb/s的光纤传输实验。为了适应高速率、长距离通信的需要, 不仅要尽量减小光纤的损耗和色散, 也要研制动态单模半导体激光器。近几年来, 分布反馈激光器、外腔激光器和耦合腔 (C^3) 激光器都受到重视、得到发展。

(4) 光纤综合业务用户网及本地网已成为发展光纤通信的重要方向。目前, 发达国家正在竞相试验和试用综合业务用户网, 它能低成本地提供宽带多功能服务, 被视为未来信息社会的理想的通信方式。

(5) 光纤通信中的新技术, 例如波分复用 (WDM) 技术、相干光通信技术等已引起人们的兴趣并得到迅速发展, 其中波分复用技术在某些国家已实用化。

光纤通信之所以能得到如此迅速发展, 与光纤通信的优越性是分不开的。光纤通信的主要优点有:

(1) 光纤的传输损耗低、容量大。

(2) 尺寸小, 重量轻, 有利于敷设和运输。

(3) 不存在电磁干扰问题, 适合应用于有强电干扰和电磁辐射

的环境中。

(4) 光纤之间的串话小。

(5) 制造光纤的主要原料是 SiO_2 ，它是地球上蕴藏最丰富的物质，取之不尽，用之不竭。

我国早在1963年就开始研究大气激光通信，从1974年开始研究光纤通信。目前，多模及单模光纤、光缆、长短波长的光源及检测器件都已能自行生产，二次群(8.448Mb/s)和三次群(34.368 Mb/s)光纤通信系统已在某些城市进入市话网，四次群(139.264 Mb/s)光纤通信系统也即将实用，预计在今后的几年中会得到更快的发展。

总之，光纤通信已经成为一项实用化的技术。当然，要使它得到广泛应用，还必须继续降低成本。这需要从理论和实践两个方面进行努力。

第一章 光纤的传输理论

分析光纤中光的传输，可以用两种理论：射线光学（即几何光学）理论和波动光学理论。射线光学是忽略波长 λ 的光学，是用光射线去代表光能量传输路线的方法。这种理论对于光波长远远小于光波导尺寸的多模光纤是容易得到简单而直观的分析结果的，但对于复杂的问题，射线光学只能给出较粗糙的概念。

波动光学是把光纤中的光作为经典电磁场来处理，因此，光场必须服从麦克斯韦方程组以及全部边界条件。从波动方程和电磁场的边界条件出发，可以得到全面、正确的解析或数字结果，给出波导中容许的场结构形式，即模式，从而给出光纤中完善的场的描述。

本章先用射线光学理论简单分析一下光在多模光纤中的传输情况，然后着重于波动光学理论的分析。

§ 1.1 光纤的基本性质

一、光纤的结构、分类和光的传输

1. 光纤的结构和分类

光通信中使用的光纤是横截面很小的可挠透明长丝，它在长距离内具有束缚和传输光的作用。

图1.1-1是光纤的横截面图。从图中可以看出，光纤主要是由纤芯、包层和涂敷层构成。纤芯是由高度透明的材料制成的，包层的折射率略小于纤芯，从而造成一种光波导效应，使大部分的电磁场被束缚在纤芯中传输。涂敷层的作用是保护光纤不受水汽的侵蚀和

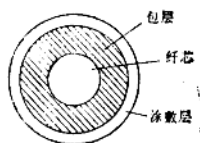


图 1.1-1 光纤的结构

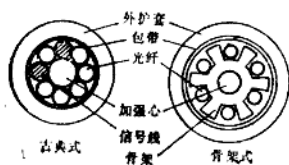


图 1.1-2 光缆结构

机械的擦伤，同时又增加光纤的柔韧性。在涂敷层外，往往加有塑料外套。

为了便于工程上安装和敷设，常常将若干根光纤组合成光缆。光缆的结构繁多，图1.1-2给出的是我国较为普遍采用的古典式和骨架式两种结构。光缆中的钢质加强心，一方面是为了提高其抵抗张力的能力，另一方面由于加强心的膨胀系数小于塑料，所以它能抵制塑料的伸缩从而使光缆的温度特性有所改善。

按光纤的原材料的不同，光纤分以下几种类型：

(a) 石英系光纤。这种光纤的纤芯和包层是由高纯度的 SiO_2 ，掺有适当的杂质制成，例如用 $\text{GeO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 和 $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{SiO}_2$ 作芯子，用 $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 作包层。目前，这种光纤的损耗最低，强度和可靠性最高，应用最广泛，但价格也较高。

(b) 多组份玻璃纤维。如用钠玻璃($\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO}$)掺有适当杂质制成。这种光纤的损耗较低，但可靠性尚存在一些问题。

(c) 塑料包层光纤。这种光纤的芯子是用石英制成，包层是硅树脂。

(d) 全塑光纤。这种光纤的芯子和包层都由塑料制成。塑料光纤的价格低于石英光纤，但损耗大、可靠性尚存在一定问题。

光通信中主要用石英光纤，我们以后所说的光纤也主要是指石英光纤。

根据光纤横截面上折射率分布的情况来分类，光纤可分为阶跃

折射率型和渐变折射率型（也称为梯度折射率型）。对于阶跃折射率光纤，在纤芯中折射率分布是均匀的，在纤芯和包层的界面上折射率发生突变；而对于渐变折射率光纤，折射率在纤芯中连续变化。

根据光纤中的传输模式数量分类，光纤又可分为多模光纤和单模光纤。在一定的工作波长下，多模光纤是能传输许多模式的介质波导，而单模光纤只传输基模。

多模光纤可以采用阶跃折射率分布，也可以采用渐变折射率分布。单模光纤多采用阶跃折射率分布。因此，石英光纤大体上也可以分为多模阶跃折射率光纤、多模渐变折射率光纤和单模阶跃折射率光纤三种，它们的结构、尺寸、折射率分布及光传输的示意图如图1.1-3所示。

光纤类型与折射率分布、光的传输	芯径 (μm)	包层直径 (μm)	频带宽度	接续和成本
<p>a) 多模阶跃折射率光纤</p>	50	125	较大, <200MHz·km	接续较易 成本费最小
<p>b) 多模渐变折射率光纤</p>	50	125	大 200MHz~ 3GHz·km	接续较易 成本费较大
<p>c) 单模阶跃折射率光纤</p>	<10	125	很大 >3GHz·km	接续较难 成本费较小

图 1.1-3 三种主要类型的光纤

2. 光的传输

(1) 多模阶跃折射率光纤中光的传输

可以用射线光学理论分析多模光纤中光的传输问题。

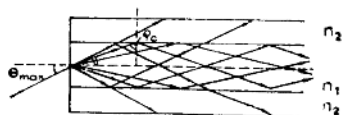


图 1.1-4 阶跃折射率光纤的子午光线

在多模阶跃折射率光纤的纤芯中，光按直线传输，在纤芯和包层的界面上光发生反射。由于包层的折射率 n_2 小于纤芯的折射率 n_1 ，所以存在着临界角 φ_c 。当光线在界面上的入射角 φ 大于 φ_c 时，将产生全反射现象。若 $\varphi < \varphi_c$ ，入射光有一部分反射，另一部分通过界面进入包层，经过多次反射以后，光能量很快衰减。因此，只有满足全反射条件的光线才能携带能量传向远方。

临界角 φ_c 由下式决定：

$$\varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1-1)$$

若光源发射的光经空气以后耦合到光纤中，那么满足光纤中全内反射条件的光的最大入射角 θ_{max} 满足

$$\begin{aligned} \sin \theta_{max} &= n_1 \sin(90^\circ - \varphi_c) \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \quad (1.1-2)$$

定义光纤的数值孔径为

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1-3)$$

数值孔径表示光纤的集光能力。

实际上，光的全反射现象远非射线光学描述的这么简单。全反射仅仅是能量全反射，在靠近界面的包层介质中仍具有电磁波，只是透射波的场分量沿垂直于界面的方向按指数规律衰减，即所谓是倏逝波。而且透射波的波矢量有平行于界面的分量，从而构成了表面波。Goos-Hänchen的实验证实了光表面波的存在，证明并不是入射波抵达界面时，就在该点反射，而是反射点离入射点有一段距离。

在多模阶跃折射率光纤中，满足全反射、但入射角不同的光线

的传输路径是不同的，结果使不同的光线所携带的能量到达终端的时间不同，从而产生了脉冲展宽，这就限制了光纤的传输容量。

从射线光学的观点可以计算多模阶跃折射率光纤中子午光线的最大群时延差。子午光线是处在一个子午面（包含光纤轴线的平面）内，经过光线的轴线在周围界面间作内部全反射的光线，如图1.1-4所示。设光纤的长度为 L ，光纤中平行轴线的入射光线的传输路径最短，为 L ；以临界角入射到纤芯和包层界面上的光线的传输路径最长，为 $\frac{L}{\sin\varphi_c}$ 。因此，最大时延差为

$$\Delta\tau_d = \frac{\frac{L}{\sin\varphi_c} - L}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (1.1-4)$$

定义光纤的相对折射率差为

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.1-5)$$

单位长度光纤的最大群时延差为

$$\Delta\tau_d \approx \frac{n_1 \Delta}{c} \quad (1.1-6)$$

群时延差限制了多模阶跃折射率光纤的传输带宽，使它的传输带宽一般小于 $200\text{MHz}\cdot\text{km}$ 。为了减小多模光纤的脉冲展宽，人们制造了渐变折射率光纤。

(2) 多模渐变折射率光纤中光的传输

渐变折射率光纤的折射率在纤芯中连续变化。适当地选择折射率的分布形式可以使不同入射角的光线有大致相等的光程，从而大大减小群时延差。渐变折射率光纤的脉冲展宽，可以减小到仅有阶跃折射率光纤的 $1/100$ 左右。

光纤的光学特性决定于它的折射率分布。在渐变折射率光纤中，纤芯中折射率的分布是变化的，而包层中的折射率通常是常数，用 n_c 表示。纤芯中折射率分布可用方幂律式表示。

故渐变折射率光纤的折射率 $n(r)$ 分布可以表示为

$$n(r) = \begin{cases} n_0 \left(1 - \Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g\right) & r < a \\ n_a & r \geq a \end{cases} \quad (1.1-7)$$

g 是折射率变化的参数, a 是纤芯半径, r 是光纤中任意一点到中心的距离, Δ 是渐变折射率光纤的相对折射率差, 即

$$\Delta = \frac{n_0 - n_a}{n_0} \quad (1.1-8)$$

阶跃折射率光纤也可以认为是 $g = \infty$ 的特殊情况。使群时延差减至最小的最佳的 g 在2左右, 称为抛物线分布。下面用射线光学理论分析渐变折射率光纤中子午光线和偏射线的传输性质。

①近轴子午光线

光线在介质中的传输轨迹应该用射线方程表示^[2]:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (1.1-9)$$

式中 \vec{r} 是轨迹上某一点的位置矢量, ds 是沿轨迹的距离单元, ∇n 表示折射率的梯度。

将射线方程应用到光纤的圆柱坐标中, 讨论抛物线分布的光纤中的近轴子午光线, 即和光纤轴线夹角很小, 可近似认为平行于光纤轴线(z 轴)的子午光线。由于光纤中的折射率仅在径向变化, 沿圆周方向和 z 方向是不变的。因此, 对于近轴子午光线, 射线方程可简化为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \quad (1.1-10)$$

式中 r 是射线离开轴线的径向距离。对抛物线分布, 有

· 在有些书中, 纤芯中折射率分布表示为: $n(r) = n_0 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g\right]^{1/2}$, 将此式展开且忽略高次项, 仅保留两项, 便得到(1.1-7)式。两式非常接近, 但从(1.1-7)式出发, 可使许多分析计算简化。

$$\frac{dn}{dr} = -\frac{n_0 \Delta}{a^2} \cdot 2r \quad (1.1-11)$$

将上式代入(1.1-10)式中, 得

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = -\frac{2n_0 r}{na^2} \cdot \Delta \quad (1.1-12)$$

对近轴光线, $\frac{n_0}{n} \approx 1$, 因此上式可近似为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} \approx \frac{2r}{a^2} \cdot \Delta \quad (1.1-13)$$

设 $z = 0$ 时, $r = r_0$, $\frac{dr}{dz} = r'_0$, 上式的解为

$$r = r_0 \cos\left[(2\Delta)^{1/2} \frac{z}{a}\right] + r'_0 \frac{a}{(2\Delta)^{1/2}} \sin\left[(2\Delta)^{1/2} \frac{z}{a}\right] \quad (1.1-14)$$

这就是抛物线分布的光纤中近轴子午光线的传输轨迹。图1.1-5显示了当 $r_0 = 0$ 和 $r'_0 = 0$ 时这些光线的轨迹。可以看出, 从光纤端面上平行入射的光线或从光纤端面上同一点发出的近轴子午光线经过适

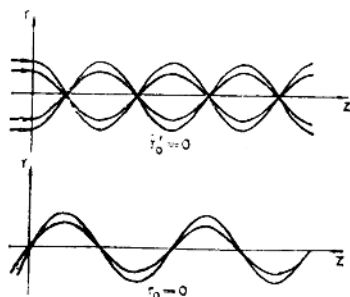


图 1.1-5 抛物线分布光纤中的近轴子午光线的传输轨迹

当的距离后又重新汇聚到一点。也就是说，它们有相同的传输时延，有自聚焦性质。

如果不作近轴光线的近似，分析过程就会变得比较复杂，但从射线方程同样可以证明，当折射率分布取双曲正割函数时，所有的子午光线具有完善的自聚焦性质。自聚焦光纤的折射率分布为

$$n(r) = n_0 \operatorname{sech} ar \\ = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} \alpha^2 r^2 + \frac{5}{24} \alpha^4 r^4 + \dots \right] \quad (1.1-15)$$

式中 $\alpha = \frac{\sqrt{2\Delta}}{a}$ 。可见抛物线分布是 $\operatorname{sech}(ar)$ 分布的忽略高次项的近似。

② 偏射线

除子午光线外，多模光纤中还存在着偏射线。偏射线是不在一个平面内的空间曲线，它不与光纤轴线相交。图1.1-6给出一根偏射线在垂直于光纤轴线平面上的投影。可以看出，偏射线在两个焦散面之间振荡，并且与焦散面相切，在焦散面之内是驻波，以外则作衰减。对阶跃折射率光纤，外焦散面就是纤芯和包层的界面，内焦散面的位置与入射角度有关。对渐变折射率光纤，外焦散面并不一定与纤芯和包层的界面重合。

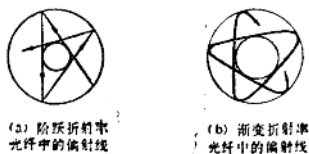


图 1.1-6 多模光纤中的偏射线

在渐变折射率光纤中，如果两个焦散面重合，偏射线则成为螺旋线。螺旋线的特点是仅仅改变角度 φ 和距离 z ，而 $r = \text{常量}$ ，所以它必然满足条件

$$\frac{dr}{dz} = 0 \quad (1.1-16)$$

从这个条件出发，利用圆柱坐标系中的射线方程，可以推导出。若要传输螺旋线，光纤纤芯折射率的分布应为

$$n(r) = n_0 [1 + (\alpha r)^2]^{-\frac{1}{2}}$$

$$=n_0\left[1-\frac{1}{2}(ar)^2+\frac{3}{8}(ar)^4-\dots\right] \quad (1.1-17)$$

若仅保留零次项和二次项，则上式也可近似为抛物线分布。

螺旋线不能产生自聚焦，不同角度入射的螺旋线不会聚在一点，它们仍然有群时延差存在。

总结以上的分析可知，要想子午线聚焦，折射率分布须用 $n(r) = n_0 \operatorname{sech}(ar)$ 的形式，但在这种分布形式中，偏射线并不能得到自聚焦性质；要想得到螺旋线，折射率分布应为 $n(r) = n_0(1+(ar)^2)^{-\frac{1}{2}}$ 。螺旋线不能自聚焦。所以射线光学理论很难得出最佳的折射率分布。由于以上分析所得的两种折射率分布形式都和抛物线分布形式接近，所以 $g=2$ 的抛物线分布是目前通行的分布形式。但它不一定是最优的分布规律，并不一定能使群时延差达到最小值。最佳的折射率分布规律在第四节中用 WKB 法进行分析。

二、光纤的传输性质

损耗和色散是光纤的两个主要的传输特性。

1. 光纤的损耗

传输损耗是光纤很重要的一项光学性质，它在很大程度上决定着传输系统的中继距离。损耗的降低依赖于工艺的提高和对石英材料的研究。

对于光纤来说，产生损耗的原因较复杂，它不象金属波导那样容易计算损耗量的大小，损耗量的具体确定往往依赖于实验测量。这里简单说明一下损耗机理。

不论是哪种类型的石英光纤，损耗的产生都是由以下因素造成的：

(a) 纤芯和包层物质的吸收损耗，包括石英材料的本征吸收和杂质吸收；

(b) 纤芯和包层材料的散射损耗，包括瑞利散射损耗以及光纤

在强光场作用下诱发的受激喇曼散射和受激布里渊散射；

(c) 由于光纤表面的随机畸变或粗糙所产生的波导散射损耗；

(d) 光纤弯曲所产生的辐射损耗；

(e) 外套损耗。

这些损耗机理又可分为两种不同的情况。一种是石英光纤的固有损耗机理，象石英材料的本征吸收和瑞利散射，这些机理限制了光纤所能达到的最小损耗；还有一种是由于材料和工艺所引起的非固有损耗机理，它可以通过提纯材料或改善工艺而减小甚至于消除其影响，如杂质的吸收、波导的散射等。

(1) 石英光纤的固有损耗

光纤材料的本征吸收和本征散射是光纤的固有损耗机理。光纤材料的本征吸收有两个频带，一个在红外波段，其吸收峰在 $8\sim 12\mu\text{m}$ 波长区域，对光纤通信影响不大；另一个在紫外波段，其尾巴会拖到 $0.7\sim 1.1\mu\text{m}$ 的波段，对光纤通信产生一定的影响。

光纤材料的本征散射主要指瑞利散射，它是由于光纤中折射率在微观上的随机起伏所引起。石英光纤在加热拉制过程中，由于热骚动，使原子得到的压缩性不均匀，这使物质的密度不均匀，进而使折射率不均匀，这种不均匀性在冷却的过程中被固定下来。这种不均匀度与波长相比是小尺寸的，因此产生的散射称为瑞利 (Rayleigh) 散射。瑞利散射按 $1/\lambda^4$ 的比例产生损耗，在较长的波长上传输时，瑞利散射损耗大大减小。理论和实验指出，熔融二氧化硅的瑞利散射极限值在波长为 $0.63\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 和 $1.3\mu\text{m}$ 处分别为 4.8 、 0.8 和 0.3dB/km 。

图1.1-7所示是一根典型的石英光纤的频谱损耗曲

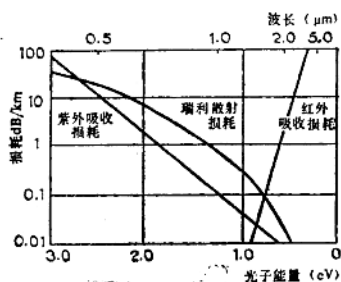


图 1.1-7 掺锗二氧化硅光纤固有损耗机理