

光纤通信系统

张 煦 编 著

電子工業出版社

光纤通信系统

张 煦 编著

电子工业出版社

内 容 简 介

本书分八章。首先介绍光纤技术的发展过程。其次在理论上较详细地解释光纤传输系统的一些特性要素。接着择要叙述长波长光纤、光器件和光系统，包括多模光纤和单模光纤系统。然后分别介绍波分复用光纤通信系统，相干外差光纤通信系统和综合服务光纤信息网，包括局部地区网和市内宽带网。最后概述光纤传感技术，这是一种重要的非通信应用。附录介绍了光纤中的偏振。

本书可作为大专院校光纤通信和信息传输专业师生的主要参考书，也可供从事光纤通信研究、设计、制造和运用的科技工程人员学习和参考之用。

光纤通信系统

张 煦 编著

责任编辑：连潮东

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县宏飞印刷厂印刷

开本：850×1168毫米1/32 印张：10.652 字数：237千字

1987年8月第一版 1987年8月第一次印刷

印数：1—3,500册 定价：2.65元

统一书号：15290·482

前 言

光纤通信技术是近年来迅猛发展的新兴技术，是世界新技术革命的重要标志，又是未来信息社会中各种信息网的主要传输工具。尤其是最近几年，光纤通信技术不断更新，飞跃般地向前推进。国内已注意到光纤通信的优越性和美好前途，把它列为我国科技发展的优先领域，许多单位积极开展光纤通信技术的研究和试制，甚至实际安装和运用。

光纤通信在过去是短波长 $0.85\mu\text{m}$ 多模光纤系统，近年转向长波长 $1.3\mu\text{m}$ 并再进至 $1.55\mu\text{m}$ ，从多模光纤转向单模光纤系统。激光技术相应地急剧进展，光纤通信各种器件的工艺和性能都有明显革新。如果说过去的光纤通信系统是第一代，那么现在的光纤通信系统可称处于第二代。

学校里自 1979 年起开出《光纤通信原理》课程，并曾印发讲义。现在时隔五年，其内容必须加以充实和刷新。这本《光纤通信系统》书稿正是在这样的要求下编写的，它着重地反映光纤通信技术最近的进展情况，也可以说是原理书的读编。

本书共分八章：第一章讲光纤通信发展过程，包括进展年历和主要文献单，这章主要参考厉鼎毅博士 1983 年文章。第二章讲光纤传输系统特性要素，占较长的篇幅，摘自 Dr.S.D.Personick 1981 年出版的《光纤传输系统》一书的精华，重新加以整理编写，附有习题。第三章讲长波长光纤和光器件，包括 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 两种长波长。第四章讲长途光纤通信系统，包括长波长多模光纤系统，但更重要的是长波长单模光纤系统在长途通信的实验应用。第五章讲波分复用光纤通信，包括合波器和分波器。第六章讲外差和相干光纤通信，包括光外差检测的益处和相干通信对激光管和激光偏振的要求。第七章讲综合服务光纤信息

网，包括局部地区网、市内宽带网、图象通信和综合信息网，是作者1984年在几种不同场合发表的四篇学术报告。第八章讲光纤传感技术，这是光纤的非通信应用，有很广泛的用途。附录介绍光纤中偏振的原理。每章都附有参考文献。

本书编写的目的，不仅为学校通信专业的教学工作服务，而且也为广大研究所、工厂、通信企事业单位从事与光纤通信有关工作的工程技术人员服务。对于阅读过《光纤通信原理》书的同志们，希望能参阅这本《光纤通信系统》书，使知识能够适应光纤技术最近进展动向。本书手稿承武汉邮电科学研究院总工程师赵梓森同志审阅，特此表示衷心感谢。读者同志们如发现书中有错误或欠妥之处，切望批评指教，以便今后改正。

张 煦

1984年12月于上海交通大学

目 录

第一章 光纤通信发展过程	1
§ 1.1 光通信的早期发现	1
§ 1.2 光纤发展过程	2
§ 1.3 光器件发展过程	12
§ 1.4 光纤系统发展过程	21
§ 1.5 光纤通信前途展望	27
§ 1.6 光纤通信进展年历	32
参考文献	33
第二章 光纤传输系统特性要素	50
§ 2.1 光纤	50
§ 2.2 光发送机	66
§ 2.3 光接收机	79
§ 2.4 分系统间交互作用	118
§ 2.5 光纤系统应用考虑	127
习题	139
第三章 长波长光纤和光器件	141
§ 3.1 长波长光纤	142
§ 3.2 长波长激光管	150
§ 3.3 长波长发光管	161
§ 3.4 长波长PIN/FET	168
§ 3.5 长波长雪崩管	170
参考文献	177
第四章 长途光纤通信系统	179
§ 4.1 光纤在长途通信中的应用	179
§ 4.2 长波长多模光纤系统	181
§ 4.3 长波长单模光纤系统 I	183
§ 4.4 长波长单模光纤系统 II	195

§ 4.5 单模光纤系统性能限制	206
参考文献	211
第五章 波分复用光纤通信	213
§ 5.1 波分复用原理	213
§ 5.2 合波器技术指标	217
§ 5.3 合波器结构和特性	219
§ 5.4 双波长的发光管和光电管	225
§ 5.5 应用前途	227
参考文献	230
第六章 外差和相干光纤通信	232
§ 6.1 数字通信的相干检测	232
§ 6.2 无线电外差检测和光外差检测	236
§ 6.3 为什么光纤通信要考虑光外差检测	238
§ 6.4 外差检测究竟提高灵敏度多少?	239
§ 6.5 激光管的频稳度和谱纯度	241
§ 6.6 单偏振单模光纤和偏振匹配	243
§ 6.7 光纤中的光非线性	246
§ 6.8 激光管放大器的发展可能性	247
§ 6.9 外差/相干光纤通信系统前景	250
参考文献	251
第七章 综合服务光纤信息网	254
§ 7.1 局部地区光纤数据网	254
§ 7.2 市内光纤宽带综合服务网	264
§ 7.3 图象通信的发展趋向	270
§ 7.4 未来的综合信息网	283
参考文献	297
第八章 光纤传感技术	298
§ 8.1 引言	298
§ 8.2 光纤干涉仪	299
§ 8.3 光纤声传感器	304
§ 8.4 光纤磁传感器	309
§ 8.5 旋转率和加速度传感器	312

§ 8.6 光纤幅度传感器.....	315
§ 8.7 结语.....	319
参考文献	320

附 录 光纤中的偏振..... 321

§ A. 1 引言	321
§ A. 2 模式双折射	321
§ A. 2 微扰和偏振耦合	323
§ A. 4 怎样使双折射小	325
§ A. 5 怎样使双折射大	326
§ A. 6 随机偏振耦合的分析	328
§ A. 7 偏振引起噪声和色散	329
§ A. 8 结语	331

第一章 光纤通信发展过程

§1.1 光通信的早期发现

大约一百年以前, 1830年, 在英国《自然》杂志上发表了A. G. Bell (贝尔) 的文章^[1], 介绍他发明的“光电话”设备, 利用日光的光束作为载波, 传输讲话信号约二百米距离。这在历史上是光通信基本原理的最早示范。但后来它没能够得到实际应用, 主要原因是当时缺乏可靠的强光源, 又没有可靠的低损耗传输媒介。

直到1960年, 激光技术变为现实, 这确实是重大发明, 它给光通信重新带来生命力, 显示有实用的可能性。激光器正是长期盼望的可靠强光源, 利用激光作为载波可以传递信息。从那时起的几年里, 不仅激光器件有了具体的发展, 而且传输媒介也有认真的考虑和试验, 特别是激光经过大气的视距传输和利用周期性聚焦透镜的光束波导传输, 贝尔研究所S. E. Miller等人发表了光通信这些方面研究的文章^[2]。那几年里, 毫米波和光波介质波导的理论研究有开展, 包括圆柱形介质波导, 即光导纤维。但当时玻璃光纤呈现的传输损耗达1000 dB/km左右, 比通信所要求的值大两个数量级, 还谈不上什么实际应用价值。

1966年7月英国标准电信研究所K. C. Kao (高锟) 和G. A. Hockham发表文章^[3], 明确提出带有包层的玻璃光纤可以用作通信传输媒介, 现在公认这篇文章代表光纤能够实用于通信的最早预测和发现。1965~69年期间, 他们又报导^[4]二氧化硅玻璃块在光波长 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 测得损耗折算为5 dB/km。1970年11月, 美国康宁玻璃公司在《应用物理通讯》期刊上正式宣布^[5], 它研制成功了带有掺杂的二氧化硅光纤波导, 损耗降低至

50dB/km。当时被认为该损耗值标志着突破光纤能够用于通信应用的门限。自此以后，光纤通信正式揭开序幕，它的有关各方面全面开始迅猛发展。

§1.2 光纤发展过程

理论研究 介质波导的传播理论虽然早已有过文章，但直至四十年代后期，微波技术兴盛，介质波导的研究才引起人们注意，又直至六十年代初期，激光技术出现，才有人开始研究圆柱介质波导。考其来历，光纤波导传播的理论研究确实是来源于介质波导，也来源于微波波导。但是，六十年代关于光纤的基本理论研究，主要是关于低阶受导模的波特性和，没有考虑到信号衰减和畸变，而这些方面，后来称为光纤损耗和色散的两大特性，恰恰对信息传输至关重要。况且，早期的理论研究虽有完整和严格的推导和分析，却没有得出简要的解析式足以用来理解光纤波导的设计以适合通信应用。1969年起，一些科技工作者认识到通信应用的光纤波导具有这样的特点，即纤芯与包层间的相对折射率差很小， $\Delta \ll 1$ ，例如 $\Delta = 0.01$ 或更小，光纤属于“弱导”的波导，可以推得十分有用的近似解析式。特别在1970年10月，贝尔研究所 D.Gloge 等人发表文章^[6]，给出适合实际光纤设计的简化公式，大大有利于近代光纤波导传播理论的开展。后来有人用计算数值证明，从这些简化公式得到的结果与从前严密完整分析所得结果极其接近。

从纤芯中的折射率分布来看，多模光纤可以分为二类，其一是阶跃折射率分布，即纤芯中的折射率是均匀的，到了与包层界面就阶跃般地降低到包层的折射率。其二是渐变折射率分布，即纤芯中折射率分布大约按抛物面形由大逐渐变小，最后变得与包层折射率相等。早期就知道，如用阶跃折射率分布，多模光纤的信息载荷容量很小，例如 $\Delta = 0.01$ ，光纤的带宽—距离乘积只有13 MHz·km。渐变折射率分布可以减少模间色散的概念早已在

过，光波导采用抛物面形的渐变折射率分布也在低损耗光纤成功之前已有研究。1973年11月，贝尔研究所关于渐变折射率多模光纤理论的文章^[7]提出：

$$n(r) = n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^2]^{1/2}$$

从这分布形式可得出光纤色散有关的简单而有用的结果，其中 n_1 为纤芯中心的最大折射率， Δ 为纤芯与包层的最大相对折射率差， r 是半径， a 是纤芯的半径， α 参数在2的上下。后来的理论研究证明得出这样的结论，即渐变折射率多模光纤能够传输的带宽，与光波长 λ 和分布形状 α 有极其密切的关系，最大带宽约略地表示为码速—距离乘积， $1.4/\Delta^2$ Mb/s·km。由于光纤带宽对 α 的准确值非常敏感，有一个最佳 α 值，在其附近，带宽急剧加大，曲线显示高峰。这个问题在七十年代后期，贝尔研究所D. Marcuse等人^[8]和康宁公司R. Olshansky等人发表文章^[9]指出，如纤芯中折射率分布形状稍有缺陷，最大带宽将急剧减小。继续研究工作着重于利用多种掺杂材料，使光纤在较宽的波长范围能够提供较大的传输带宽。

另一方面，理论研究表明，多模光纤沿轴心的纵方向如有波导微扰，将引起模式耦合或模式混合，从而加大光纤能够传输的带宽，使带宽与光纤长度的关系成为与 L^ν 成反比， ν 值将在0.5与1之间。如模式耦合很彻底，使传播达到稳态情况， ν 就趋近0.5，即带宽与 \sqrt{L} 成反比。然而，这些波导微扰，包括波导不规则性，随机微弯，和人为弯曲，都可能使多模光纤的信号衰减加大。在这方面，七十年上半期已有许多文章报导研究结果。必须精心设计和制造光纤，和精心设计和封装光缆，才有助于使这些增加的损耗减至最小。

单模光纤的信息载荷容量比多模光纤的大得多。早在七十年代初，多模光纤的理论研究尚未开始，就对单模光纤的色散作理论研究。对于二氧化硅单模光纤，色散的计算考虑到波导影响和材料影响，计算结果表明，不仅在 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 的波长范围可能提供很大的传输带宽，而且在 $1.3\mu\text{m}$ 附近存在最小色散点，

以致传输带宽更大。八十年代初发表的文章，报道了实际与理论最大传输带宽比较的研究结果，认为单模光纤如纤芯椭圆度小于5%，应力双折射小，拍长小于100 m，并适当选择最佳输入脉冲的宽度和单模（即单频）激光管的发射波长，有可能达到超高速传输，即传输码速100 Gb/s至100 km距离。单模光纤在选适合的设计参数时，还必须考虑到弯曲和拼接引起的损耗。理论研究表明，微弯和弯曲损耗与光纤参数的关系是很复杂的，但一般地说，如把场紧密局限，可以减小这些损耗。然而，这种情况虽减小弯曲损耗，却加大拼接损耗。把拼接和弯曲损耗一起考虑，认为只要正确选择纤芯直径和 Δ 值，它们就对折射率分布的变化不很敏感。七十年代中期，日本科技人员发表文章，报导单模光纤的双包层结构，或称W光纤（或其他名称），其特点是内包层的折射率低于外包层的折射率，可使光纤既有很低色散，又有很小拼接和弯曲损耗的优点。这是因为这种结构能够提供较大的模式光斑，易于拼接，且不会引起弯曲损耗。又因为这种结构使光纤的波导色散可以与材料色散互相抵消，以致在很宽的波长范围都得到很大带宽。这种W光纤在目前八十年代仍受到广泛重视。

损耗和带宽 光纤通信领域中最引人注目和最重要的一系列进展，是光纤本身传输损耗的迅猛减小，从1968年前的1000 dB/km减至最近的0.2 dB/km。光纤传通性的这种惊人进步主要是由实验不断改进而取得的成就，利用高纯度的原材料，并在加工制造过程中保护预制棒不受杂质侵入。迄今实际有人使用的加工制造方法有四种。

第一种是OVD，外气相沉积过程。此法是康宁公司1972年1月申请、1973年6月取得美国专利的^[10]。1980年10月由P.C.Schultz在PIEEE上作具体报道^[11]。1982年10月在IEEE-JQE上^[12]宣称获得最低的光纤损耗，即在 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 损耗低至0.16 dB/km。第二种是MCVD，修改的化学气相沉积过程。此法是贝尔研究所1974年2月申请、1980年8月取得美

国专利^[13]。1980年10月由J.B.MacChesney在PIEEE上作具体报道^[14]，1982年4月在IEEE-JQE上再作综合报道^[15]。根据这种方法，对光纤预制棒的生产工艺方法深入研究，得到世界范围内普遍接受，在商用光纤的大批量生产实际使用，1982年4月在美国Phoenix, AZ光纤通信国际会议上有一篇文章宣读^[16]。第三种是VAD，气相轴向沉积过程，是日本人1977年4月申请、同年12月取得美国专利^[17]。1980年10月由T.Izawa等人在PIEEE上作具体报道^[18]，1982年10月在IEEE-JQE上再作近况介绍^[19]。1982年9月在法国Cannes召开的欧洲光纤通信会议上宣称^[20]，由此法制成的多模光纤获得最大带宽，即在 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 获得带宽 $9.7 \text{ GHz}\cdot\text{km}$ 。第四种方法是PCVD，等离子化学气相沉积过程。是1977年11月申请，1979年3月取得美国专利^[21]。此法特点是沉积效率高和重复性高。1982年9月在法国Cannes召开的欧洲光纤通信会议^[22]，和1983年2月在美国New Orleans, LA光纤通信国际会议上^[23]都有文章宣读，沉积速率大于 6 g/min 。另外，还有双坩锅法，用于制造大数值孔径(NA)的多模光纤，成本低廉，例如制成 $\text{NA} = 0.4$ 的多模光纤，损耗仍能在 10 dB/km 以下，1982年9月在法国Cannes召开的欧洲光纤通信会议上有一篇文章宣读^[24]。看来，迄今为止，制造光纤预制棒的各种气相沉积过程相互间都有竞争力，它们要在沉积速率、传输损耗、带宽等几方面性能占优势。最后看这几种方法在经济上哪一种特别低廉，这将是唯一的决定性因素，确定哪一种或几种方法在世界范围将来大批量生产得到最普遍的应用。

图1-1示二氧化硅玻璃掺杂制成的多模光纤近十余年来损耗一波谱特性的进展。1972年曲线是康宁报道的，1974年曲线是贝尔报道的。可见，七十年代上半期光纤的传输窗口仅在 0.8 与 $0.9 \mu\text{m}$ 间的波长，称为短波长，是GaAlAs的LED(发光二极管)和LD(激光二极管)发射的波长，损耗自 20 dB/km 降至 4 dB/km ，已经降得相当低。问题是要扩大传输窗口，把低损耗

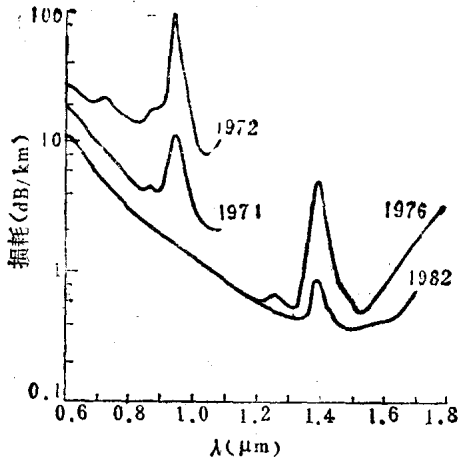


图 1-1

的波长延伸至 $1\ \mu\text{m}$ 以上，甚至 $1.7\ \mu\text{m}$ ，以便利用 InGaAsP 的 LED 和 LD 发射的波长，并利用最小色散的波长 $1.3\ \mu\text{m}$ 附近。这个关键在于减少 OH（水份）杂质，因为 $1\ \text{ppm}$ 的 OH 在波长 $0.95\ \mu\text{m}$ （OH 振动的第二谐波）引起吸收约 $1\ \text{dB/km}$ ，在波长 $1.39\ \mu\text{m}$ （第一谐波）吸收 $30\sim 40\ \text{dB/km}$ 。图上示出光纤中 OH 浓度已经从 1972 年的 $100\ \text{ppm}$ 减至 1982 年的 $10\ \text{ppb}$ 以下，减少四个数量级。这种惊人进度是由于利用氯的去水措施才取得的。利用氘—氢交换，也是减小 OH 吸收损耗的有效办法。图上示出 1976 年日本的曲线和 1982 年贝尔的曲线。一般地说，由各种气相沉积过程制成的多模光纤，其损耗在波长 $1.3\ \mu\text{m}$ 附近都能降低至 $0.6\sim 0.7\ \text{dB/km}$ 。据日本人在《电子通讯》杂志上发表的报道，1976 年 10 月 H. Osanai 宣称^[25]在 $1.3\ \mu\text{m}$ 获得最低损耗 $0.5\ \text{dB/km}$ ，1979 年 2 月 T. Miya 宣称^[26]在 $1.55\ \mu\text{m}$ 获得最低损耗 $0.2\ \text{dB/km}$ 。总的来说， $1.2\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 常称长波长，可利用 InGaAsP 的 LED 和 LD 发射的波长。损耗最低的波长是 $1.55\ \mu\text{m}$ ，色散最低的波长是 $1.3\ \mu\text{m}$ 。显然，长波长的光纤损耗比短波长的最低损耗 $2\ \text{dB/km}$ 低得多。长波长的光纤色散又比

短波长的色散小得多。为此，曾有人建议利用 $1.3\mu\text{m}$ 多模光纤和 LED 作为长途光纤传输系统，极为有利。

单模光纤的传输损耗应该稍低于多模光纤，这是因为单模光纤纤芯中的掺杂浓度较低，瑞利散射损耗较小。1970 年测得光纤损耗 20 dB/km ，1979 年报道超低损耗在 $1.55\mu\text{m}$ 的 0.2 dB/km ，都是指单模光纤。图 1-2 示出 1982 年三种气相沉积方法制成的单模光纤的损耗—波谱曲线。这是在长波长范围的，因为单模光纤总是工作在 $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长范围。从此图可见，OVD 制成的光纤有最低损耗，在波长 $1.5\mu\text{m}$ ，损耗低至 0.16 dB/km 。而 VAD 制成的光纤呈现最低的 OH 吸收损耗，在波长 $1.39\mu\text{m}$ ，OH 吸收仅 0.1 dB/km ，OH 的浓度仅几个 ppb。至于 MCVD 光纤，是压低内包层折射率的型式，为海底光缆应用研制的，要求同时获得低损耗，弯曲不灵敏，且在 $1.3\mu\text{m}$ 时出现低色散。

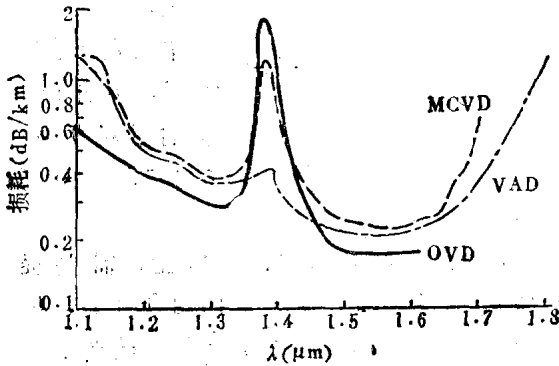


图 1-2

多模光纤为了获得较大的传输带宽，要求沉积过程有高度精密的控制，因为稍些偏离最佳折射率分布就可能急剧地减小最大可得的带宽。由 MCVD 法和 OVD 法制成的光纤，据康宁公司 1978 年^[27]和贝尔研究所 1981 年报道^[28]， $1.3\mu\text{m}$ 多模光纤测量的结果，实际测得的最大带宽—距离乘积为 $3\sim 5\text{ GHz}\cdot\text{km}$ ，比理论最大值小几倍。1982 年 4 月美国 Phoenix, AZ 光纤通信国际学术会议上宣读文章^[29]，宣称大批量生产的长波长多模光

在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的带宽的统计平均值仅为 $1.830 \text{ GHz}\cdot\text{km}$ 。由 VAD 法制成的渐变折射率分布多模光纤，选出分布控制最好的一组 10 根光纤接成总长度 62.9 km ，测得带宽一波谱曲线如图

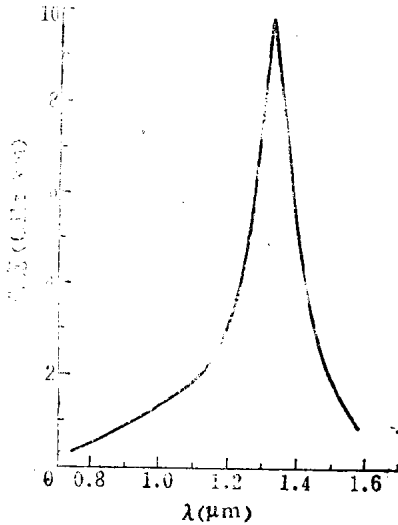


图 1-3

1-3所示，平均带宽在波长 $1.31 \mu\text{m}$ 为 $6 \text{ GHz}\cdot\text{km}$ ，这是在 1982 年 9 月法国 Cannes 的欧洲光纤通信学术会议上由日本人报道的。

通常的阶跃折射率分布单模光纤，有一个最小模内色散的波长 λ_0 ，在 1.30 与 $1.35 \mu\text{m}$ 之间，如光纤由单模（单频）激光管发射 λ_0 来激励，将获得极大的带宽。如单模光纤选用较小的纤芯直径，例如 $4\sim 5 \mu\text{m}$ ，和较大的相对折射率差， $\Delta > 0.005$ ，就有可能把这最小色

散的波长 λ_0 移至最小损耗的波长 $1.5\sim 1.6 \mu\text{m}$ ；但是，为了把 Δ 值从 0.002 提高至 0.005 以上，需要提高掺杂浓度，这就加大瑞利散射损耗。1982 年 1 月，贝尔研究所报道了^[30]利用三角形折射率分布，可使单模光纤在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 兼得最小色散和超低损耗 0.24 dB/km 。另一种办法是利用多重包层的结构，内包层的折射率特别压低，可使最小模内色散的波长自由移动。高码速的长途系统和海底系统曾采用双包层单模光纤，工作于波长 $1.3 \mu\text{m}$ ，内包层掺杂用氟，其折射率是压低的。如内包层厚度稍小于纤芯半径，内包层折射率压低的值（相对于外包层折射率）大约与纤芯的折射率阶跃相同，则双包层光纤可能在两个波长呈现最小色散，因而在较宽的波长范围里呈现极低色散。不过，这种光纤在长波长容易发生弯曲损耗。1982 年 11

月 L.G.Cohen 等人在《电子通讯》报道^[31]四包层单模光纤（两个折射率井）可以扩充最小色散的有用范围，并减小弯曲损耗。图 1-4 示单模光纤模内色散的波谱曲线，虚线代表通常二包层阶跃折射率分布的光纤色散，实线代表四包层光纤测得的色散。其折射率分布如图的右上角所示。用了四包层，可以在 1.28~1.65 μm 波长范围内保持色散小于 2ps/km·nm，所以被称超宽带光纤。它可以缓和多纵模激光管发生的模式分隔噪声，又容许多群高码速的波分复用。

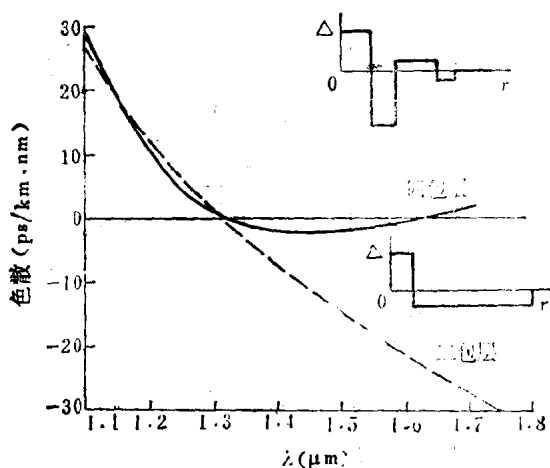


图 1-4

光纤结构^① 阶跃折射率分布的多模光纤有很大的模间色散，因而能够传输的带宽很小。但是，如果加大它的纤芯直径和加大数值孔径，则可以提高 LED 的入纤光功率。在制造光纤时，实际上并不是纤芯之外就是包层，而是在两者之间有缓冲层，它可以用来防止杂质从包层侵入纤芯；况且由于缓冲层的折射率小于包层，它加大数值孔径。图 1-5 (a) 就是大纤芯、大 NA 的光纤；

① 摘自 K.C.Kao: Optical Fiber Systems, Technology, Design, & Applications, 1982, pp 32~37.