表 1-1　ITU-T 单模光纤标准种类与标准一览表

标准号	创立年份	当前实施版本及通过日期	当前实施版本划分的光纤子类
G.652	1988	第八版/2009.11	A、B、C、D
G.653	1988	第七版/2010.07	A、B
G.654	1988	第八版/2010.07	A、B、C
G.655	1996	第五版/2009.11	A、B、C、D、E
G.656	2004	第三版/2010.07	—
G.657	2006	第一版/2009.11	A1 和 A2，B2 和 B3

1.4　光纤制备工艺的发展

1.4.1　单模光纤的发展

表 1-1 所示单模光纤中，G.652 D 单模光纤是当前光纤通信网络的主流光纤，G.653、G.654、G.656 三类光纤在当前通信网络中基本不使用，G.655 单模光纤有少量使用，而 G.657 单模光纤的应用需求呈现不断增长的趋势。下面对 G652 和 G.657 两种光纤进行重点阐述。

1.4.1.1　G.652 单模光纤的发展

20 多年来，G.652 光纤一直是全球光纤市场的主流产品，甚至被称为标准单模光纤或者常规单模光纤。即使是这种老牌产品，近几年来也有了很大发展，其技术发展的主要趋势是拓展工作波长范围，针对城域网（Metropolitan Area Network，MAN）、光纤接入（Fiber-To-The-x，FTTx）开发适用的新型光纤，如低水峰光纤、单-多模复合光纤、高传输功率单模光纤、超低损耗单模光纤等。

（1）低水峰光纤的发展

1998 年，美国朗讯（OFS）公司首先推出了低水峰光纤。继 OFS 之后，国内外又有多家公司推出了同类产品。水峰即为 OH^- 离子引起的损耗峰，分别为950 nm、1 240 nm 和 1 390 nm，对光纤通信影响较大。2000 年，该光纤被纳入 ITU-T G.652 标准，即 G.652 C；在 2003 年版本中，增加了 G.652 D。

2003 年 3 月，美国康宁在宣布以其低水峰光纤（SMF-28e）取代普通单模光纤（SMF-28）作为其标准光纤产品的同时，也宣布了对 SMF-28e 若干项产品指标的提升。在 IWCS-2004 会议上，日本住友报道了其所研制的新型抗弯曲低水峰光纤。该光纤的主要技术特点是特别抗弯曲：在 1 625 nm 可将允许的长期弯曲半径减小

到 7.5 mm，仅为标准/常规产品指标的 1/4；当瞬时弯曲半径减小到 5 mm 时，在 1 625 nm引起的弯曲损耗为 0.05 dB/圈，仅为常规产品指标的 1/20。2005 年7 月，Draka Comteq's 公司宣布推出适合接入网、分配网应用的 BendBright 光纤。该光纤在 1 310～1 625 nm 范围可将允许的弯曲半径减小到常规单模光纤的 1/2，为 15 mm，其他特性不变。可使用更紧凑的连接盒、机架、接入端机。该光纤符合 ITU-T G.652D 标准，与其他常规单模光纤，包括该公司的 ESMF 完全相容。在 2006 年 3 月 6 日美国 Anaheim 举行的 OFC/NFOEC 会议上，OFS 介绍了该公司的新型光纤：All Wave FLEX Zero Water Peak(ZWP) Single-Mode Fiber。该光纤是第一款具有出色弯曲特性的零水峰 G.652D 光纤，是为 FTTH、企业网络以及其他任何可能遭遇小弯曲直径的应用场合而设计制造的。该光纤在 1 260～1 625 nm 的全部可用波长范围内保持非常低的弯曲损耗，可以弯成 20 mm 的光纤圈，该圈在 1 625 nm 引起的附加损耗＜0.5 dB，在 1 550 nm 引起的附加损耗＜0.2 dB，比 CSMF 的损耗好 5 倍。该光纤的微弯特性也比 CSMF 的好 2 倍，因此，有助于改善高应力、低温环境的光缆性能。

(2) 单-多模复合光纤的发展

澳大利亚比瑞利和意大利比瑞利公司分别在 IWCS-2002 会议上发表论文，介绍其研制的单-多模复合光纤以及利用该光纤进行的传输试验。该新型多用光纤的主要优点是：在 850 nm 波长，衰减比各种多模光纤都低，模带宽比传统多模光纤的高；系统易于向 SMF 升级。该光纤在 850 nm 的最低模带宽＞1 000 MHz·km；在 850 nm 的衰减系数典型值为 1.8 dB/km。长飞公司在 2003 年介绍了该公司研制的单-多模复合光纤。通过将匹配包层型单模光纤的 SI 折射率分布改成 GI 分布，该新型光纤在 850 nm 的带宽提高到 2 056.35 MHz·km，在 1 Gbit/s 速率的传输距离达到 3 km；在 10 Gbit/s 速率的传输距离达到 300 m。以上光纤仍符合常规单模光纤标准。

(3) 高传输功率单模光纤的发展

康宁公司在 2004 年 OFC 会议上推出了一种高传输功率单模光纤：NexCor fiber。该光纤的受激布里渊散射(SBS)阈值与其他 G.652 光纤相比提高了 3 dB，从而使可容许的注入功率增大了 1 倍，其他指标符合标准单模光纤特性。在 FTTH 网络中利用该新型光纤，可扩大网络覆盖的用户数目，从而降低了每个用户分摊的成本。

1.4.1.2 G.657 单模光纤的发展

FTTx 是推动光纤需求的动力和光纤市场恢复强劲的希望，光纤业界对 FTTx 技术的发展和应用热情日益高涨。在这种形势下，ITU-T（国际电信联盟远程通信标准化组织）第 15 研究组于 2006 年在瑞士日内瓦召开了 SG15 2005-2008 研究期第 4 次全会，这次全会除了对多项光纤光缆标准进行了修订之外，最引人注目的成果就是通过了 G.657 新标准，即《Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibers and Cables for the Access Network》，可见各个国家都对 FTTx 市场充满信心，并寄予厚望。

2009 年 11 月，ITU-T 正式通过了 G.657 单模光纤标准。G.657 分为 G.657 A 和 G.657 B，G.657 A 与 G.652 后向兼容，适用于 O、E、S、C 和 L 波段（1 260～1 625 nm波长范围），其传输特性和光学特性的技术要求同 G.652 D 相似，主要区别在于稍小的模场直径与较好的弯曲损耗特性。G.657 B 光纤不强调其与 G.652 光纤的兼容性，而是突出其强烈的抗弯曲性能。

G.657 A 又分为 A1 和 A2 两类，其显著区别在于 A2 类光纤具备较好的抗弯性能，其弯曲半径达到 7.5 mm，而 A1 类光纤的弯曲半径为 10 mm。

G.657 B 又分为 B2 和 B3 两类，其显著区别在于 B3 类光纤具备较好的抗弯性能，其弯曲半径达到 5 mm，而 B2 类光纤的弯曲半径为 7.5 mm。

G.657 光纤中，由于 A2 类光纤与 G.652 D 光纤具有良好的兼容性，并具有较强的抗弯曲性能，因此，当前国内使用的弯曲不敏感光纤中主要是 G.657 A2 光纤。但由于各个厂家采用了不同的抗弯曲技术，如康宁采用空气微孔实现良好抗弯性能，PCVD 工艺企业采用深下陷包层技术实现良好抗弯性能，每个光纤生产企业的波导结构差异较大，不同结构的光纤在使用过程中存在一定的不兼容性，因此，当前光纤通信网络只是小范围内小批量地进行 G.657 光纤的应用，主流还是 G.652 D光纤。

1.4.2 多模光纤的发展

随着互联网业务的高速发展，信息社会对带宽的需求与日俱增。为了充分利用骨干网带宽，人们采用密集波分复用（DWDM）技术，但是接入网的低带宽连接使得网络中的瓶颈问题逐渐突出。因此，10 Gbit/s 以太网技术应运而生，它解决了低带宽接入、高带宽传输的瓶颈问题，兼容现有局域网技术，减少网络复杂性。同时，850 nm 波长的垂直腔面发射激光器（VCSEL）以及光收发模块的开发和应用，大大

降低了网络的运行成本。采用多模光纤与廉价激光器组成的以太网宽带网络，其组网成本比单模光纤组网成本大大降低，因此，10 G 以太网得到了飞速发展，最近出现了 40 Gbit/s 的传输试验。同时，FTTH 的广泛应用促进了多模光纤市场的迅速增长，也加速了新型多模光纤的技术进步。

早在 2005 年 1 月 21 日，康宁公司就宣布推出改进型的激光器优化的多模光纤(InfiniCor eSX+fiber)，该光纤是一种 50/125-LOMMF，主要目标是用于 10 GbE，在 850 nm(10 Gbit/s)串行传输距离超过 300 m，也可以用于 LAN、SAN 以及在交换局、数据中心的高速平行互连等。2006 年 2 月，eSX+fibre 在 850 nm(10 Gbit/s)串行传输距离延长到了 550 m。康宁当前有 4 种 50/125-LOMMF 产品，它们在 10 G 以太网的传输距离分别是 82 m、150 m、300 m、550 m。对于达到 300 m 的 10 G-LOMMF，其价格是标准 MMF 的 1.5 到 1.8 倍；对于 eSX+fibre，其价格再增加 1.5到2.5 倍。

2007 年 7 月，ITU-T 发布了多模光纤新标准《用于光接入网的 50/125 μm 梯度折射率分布多模光纤光缆特性》(G.651.1)。该标准规定的光纤是众所周知的 G.651 光纤的改进型，打算用于光接入网系统或 FTTx，在 850 nm 波长 1 Gbit/s 以太网系统传输链路长度达到 550 m。该标准规定的光纤保留了 G.651 的许多特性，但其制造容差更加严格，传输特性的要求得到了大幅度提高，同时，也改善了柔韧性，易于 FTTx 环境的安装。该标准突出了如下两点：

1) 更强调了光纤的弯曲损耗特性。G651.1 标准中明确规定在弯曲直径 30 mm，2 圈弯曲情况下的弯曲损耗要小于或等于 1 dB。

2) G651.1 标准不仅提高了传输带宽要求，而且对多模光纤的色散特性作了进一步的具体要求，即零色散波长 λ_0 要求为 1 295～1 340 nm；对零色散斜率进行了分段要求，对于 1 295≤λ_0≤1 310 nm 的多模光纤，其最大零色散斜率 S_{0max}≤0.105 ps/nm^2·km，对于 1 310≤λ_0≤1 340 nm 的多模光纤，其最大零色散斜率 S_{0max}≤$375\times(1\ 590-\lambda_0)\times10^{-6}$。

高速增长的宽带需求和宽带接入技术的发展共同推进了新型廉价激光模块的商用化，这将推动低成本、高带宽、弯曲性能好的新型宽带多模光纤的应用。可以预见，新型宽带多模光纤可能是 FTTx、高速以太网、本地局域网、楼宇网等宽带接入网络的市场主流产品。

1.4.3 我国光纤制备的发展历程

1974 年，邮电部批准成立武汉邮电科学研究院光通信研究室。1976 年，武汉

邮电科学研究院研制出可供系统联试用的石英光纤，并成功进行一路黑白电视的传送试验。随后，我国在武汉、上海、天津、北京4个城市建成了光纤通信实验工程和“七五”期间的一系列国家光纤通信示范工程，当时采用的光纤及预制棒大都是我国自己制造的。

我国加强了光纤的自主创新研究与产业化发展，光纤预制棒制造技术与设备研究及产业化等方面均实现了跨越式发展。

1990年，国内自主知识产权的光纤预制棒核心制造设备——等离子体化学气相沉积(Plasma Chemical Vapour Deposition，PCVD)国产化设备在武汉邮电科学研究院研制成功，并投入光纤预制棒的生产，实现了我国光纤技术质的突破，首次实现多模光纤芯棒与单模光纤芯棒的制造。

1992年，武汉邮电科学研究院参与组建的长飞光纤光缆有限公司投入光纤的生产，当时其光纤光缆的产量为5万km。1998年，引进日本VAD技术，成立了杭州富通通信技术股份有限公司，形成了VAD光纤预制棒制造技术。

1999年，江苏法尔胜光子有限公司成立，形成了MCVD+OVD二步法的规模生产光纤预制棒技术。

1999年，特恩驰(南京)光纤有限公司，形成了MCVD光纤预制棒制造技术。

2002年，烽火通信科技股份有限公司形成了PCVD+OVD的混合工艺制造光纤预制棒的技术。

2011年，烽火通信光棒合资公司的单模光纤预制棒正式投产，其预制棒装备属于第八代VAD，工艺速率为当前国际领先水平。一期产能300 t，折合光纤1000万km，二期产能500 t，折合光纤1600万km。

经过30余年的发展，我国已经拥有了国际流行的全部4种芯棒技术(MCVD/PCVD/OVD/VAD)，全部4种外包层技术(RIT/OVD/RIC/等离子喷涂)；并具备了低水峰光纤及预制棒制造技术的大规模生产能力，形成了如下光纤预制棒的核心技术：

1) 光纤芯棒的制造工艺技术：烽火通信制备了单模芯棒、多模芯棒、特种光纤芯棒；长飞开发了PCVD制备芯棒的工艺技术；富通创新地开发了全合成外沉积技术；亨通自主开发了VAD芯棒制备工艺技术；法尔胜开发了全火焰水解法制棒技术。

2) 高速率与大尺寸光纤外包层技术：从传统的套管法(RIT)发展到RIC工艺，烽火通信和长飞的预制棒直径达到150～180 mm，单棒拉丝长度达到2 000～

3 500 km，富通、亨通和法尔胜的单棒拉丝长度也达到 2 000 km 以上。

3）光纤预制棒设备技术：由武汉邮电科学研究院自行设计开发制造 MCVD、PCVD 设备，发展到富通研制 VAD 设备，法尔胜还开发出了“单床双棒”OVD 沉积设备，每棒拉丝长度达到 1 000 km 以上。

1.5 光纤发展史

光纤自 1841 年由 Daniel Colladon 通过实验发现光线能够沿着盛水的弯曲通道传播以来（如图 1-16 所示），经历了一百多年的发展，现已成为通信的主要干线。各种特殊需要的光纤也应运而生，目前可达几十种。汇总光纤发展历史如表 1-2 所示。

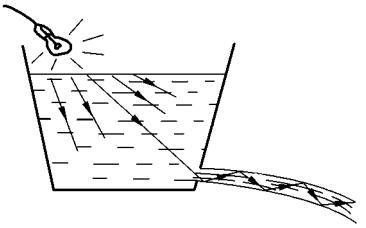


图 1-16 光沿弯曲水流传播

表 1-2 光纤的发展史

时间	代表人物或公司	主要成果
1841 年	Daniel Colladon	通过实验观察到光线能够沿着盛水的弯曲通道而传播
1854 年	英国的 John. Tyndall	在一次演讲中用实验证实了光沿着从水管喷射出来的水柱折射前进的现象
1877 年	俄国的契卡洛夫	对一个导线车间进行光导照明系统试验
1880 年	俄国的契卡洛夫	关于用管道输送光的论文在俄国《电》杂志上发表
1880 年	A. G. Bell	在英国的《Nature》杂志上介绍了利用光波作载体传送话音信息的“光电话”
1881 年	美国的 William Wheeler	在美国申请了第一个光导管的专利
1926 年	英国的 J. C. Baird	首先提出了应用光的全反射原理而制成石英纤维，并申请了透明纤维束的制造专利
1927 年	美国的 C. W. Hansell	申请了透明纤维束的制造专利
1930 年	德国的 H. Lamm 和 R. Schindler	将直径为 40 μm 的石英纤维有规则地排列起来用于肠胃检查，但效果不理想

续表

时间	代表人物或公司	主要成果
1953 年	荷兰的 A. C. S Van Heel	将一种折射率为 1.147 的塑料涂敷在玻璃纤维上，制成了玻璃芯-塑料涂层的光纤，满足了全内反射条件，但因塑料涂层不均匀使得传光效果不理想
1954 年	美国的 H. H. Hopins	在《Nature》杂志上发表了有关传像束传输图像的文章
1954 年	美国的 B. I. Hirschowitz	采用棒管制成了玻璃芯-玻璃涂层光学纤维，奠定了光纤制作工艺的基础
1954 年	美国的 J. S. Courtneypratt	提出用熔融法制造光纤面板用作电子束管的屏板，但在当时仅是一个设想
1955 年	美国的 B. J. Hirschowitz	把高折射率的玻璃棒套在低折射率的玻璃管中，放在高温炉中拉制，初步解决了光纤的光绝缘问题
1956 年	美国的 N. S. Kapany	提出“纤维光学”学科的新概念
1956 年	L. E. Curtiss	首先掌握涂层纤维实用制造法，其中芯玻璃和皮玻璃的折射率分别为 1.7 和 1.5
1957 年		开始出现闪烁发光纤维
1958 年	美国的 N. S. Kapany	提出可拉制复合光纤的新工艺，并在纤维丝上增加吸收套层以减少杂散光影响，使得光纤面板得到了实用
1958 年	美国的 L. E. Curtiss 和 B. J. Hirschowitz	研制出世界上第一根实用化光纤胃镜
1960 年	美国	解决了光纤排列工艺，制作出可弯曲、分辨率高的光纤传像束，并开始在医疗仪器中使用
1960 年		研制出红外光导纤维
1964 年	日本东北大学西泽等人	提出聚集型即梯度型折射率分布通信用光线系统
1966 年	英国标准电信公司的华裔科学家	提出将玻璃中过渡族金属离子的含量（重量比）降到 10^{-6} 以下时，光纤的吸收损耗可降到 10 dB/km
1967 年	Arridge 和 Heywood	采用一种冻结涂覆工艺将铝涂覆到石英光纤上
1967 年	Cooper	成功地进行了碳涂覆层实验
1968 年		开始研究紫外光导纤维

续表

时间	代表人物或公司	主要成果
1969 年	日本电气公司和板玻璃公司的北野等人	采用离子交换法制作出 Selfoc 型玻璃聚焦光纤
1969 年	S. E. Miller	首先提出集成光学器件的设想
1970 年	美国康宁公司	研制出损耗为 20dB/km 的光纤，证实了高锟等人的设想，从此低损耗、低色散的通信光纤得到迅速的发展
1971 年	美国康宁公司	发明了管外气相沉积法制作光纤
1973 年	美国康宁公司	采用了 CVD 法制作的石英玻璃光纤损耗以降至 4dB/km
1973 年		实验证实了光纤中的拉曼放大效应
1973 年	美国贝尔实验室	预言了光孤子的存在
1974 年	美国、日本、德国	有大量文章报道了钠钙多组成玻璃光纤的制造方法
1975 年	日本电气公司	研制了新型的 Selfoc 光纤，最低损耗已达 10dB/km
1976 年	美国加州大学	首次研制出空芯铝波导
1977 年	美国贝尔实验室	在芝加哥两电话局间开通了世界上第一条商业用光纤通信系统
1977 年	美国海军研究所	开始执行光纤传感器计划（出现了第一根熔融光纤耦合器，出现了最早的光纤环路）
1978 年	加拿大渥太华通信研究中心	首次在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏效应
1979 年	T. Miya	单模石英光纤的损耗已降至 0.2dB/km
1980 年		单模石英光纤首次应用于长途通信
1980 年	美国贝尔实验室	首次在实验中观察到光孤子
1981 年	Hidaka. t 等人	首次提出用于传输二氧化碳激光的低损耗中红外氧化物玻璃空芯光纤
1983 年	英国	出现了气送光纤技术（第一代单模石英光纤实现商用化）

续表

时间	代表人物或公司	主要成果
1984 年	美国贝尔实验室	实现商用光纤通信技术传输速率超过 1Gb/s
1985 年	英国南安普顿大学	掺铒光纤放大器研制成功
1988 年		世界上第一条海底光缆铺设成功
1989 年	美国联合技术研究中心	研制出第一个 Bragg 光纤光栅
1990 年		研制出截止波长位移光纤 G.654
1991 年	新西兰南北两岛之间	铺设了第一根碳涂敷光纤商用海底电缆
1993 年	美国朗讯科技公司	发明真波光纤
1994 年	法国电信公司	提出多芯单模光纤新概念
1995 年	美国贝尔实验室	研制出第一台商用 DWDM 光波通信系统
1996 年	世界电信标准大会	正式颁布了 ITU-T G.655 标准
1997 年	J. H. B. Nijhof 等人	首次报道了色散补偿光顾子可以在正或零平均色散趋于稳定传输
1998 年	美国朗讯科技公司	首家研制出海底光缆用大有效面积负色散光纤
1999 年	日本住友公司	推出新的 G.655 光纤——纯导光纤
2000 年	美国康宁公司	开发出城域光纤
2001 年	法国 Alcatel 公司	光纤传输速率突破 10.2Tb/s
2002 年	美国	FTTH 安装数量增加了 200%
2005 年	中国	3.2Tbps 超大容量的光纤通信系统在上海至杭州开通
2010 年	美国	谷歌首次测试 1GB 超高速光纤网络
2011 年	英国	英国电信宣布将投资 25 亿英镑建设最大超高速光纤宽带网络

1.6 光缆的基本结构

光纤是一种传输光束的细而柔软的媒质。光导纤维光缆由一捆光纤维组成，简称为光缆，如图 1-17 所示。光纤是光缆的核心部分，光纤经过一些构件及其附属保护层就构成了光缆。

光缆结构主要有：光纤、缓冲层和外层。光纤外层的保护层和绝缘层可防止周围环境对光纤的伤害，如水、火、电击等。

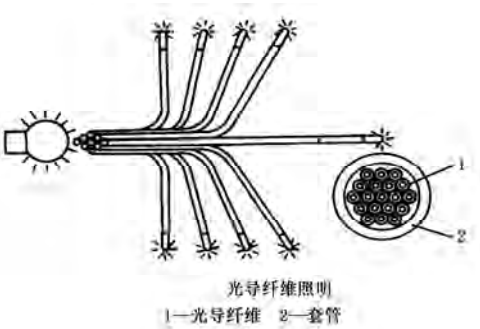


图 1-17 光纤与套管一起构成光缆

实际应用中，为提高光纤的强度、耐温性等性能，光纤必须制成光缆才能使用。成缆时可以有多种结构，通常由外护套、包带和加强芯构成，层绞式和骨架式两种常见的光缆结构，如图 1-18 所示。

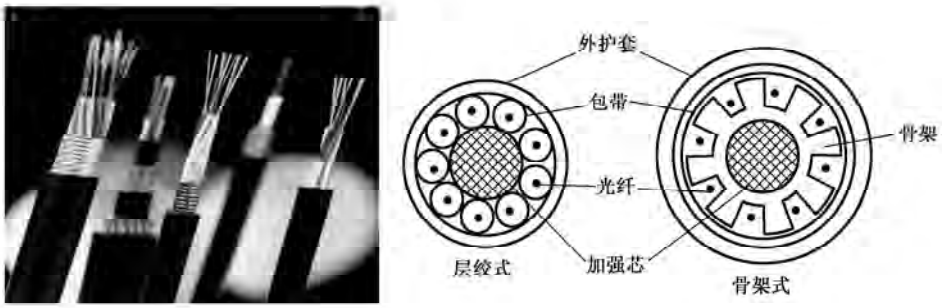


图 1-18 光缆结构

1.7 国内光纤发展的现状及前景

光纤作为宽带接入的一种主流的方式，有着通信容量大、中继距离长、保密性能好、适应能力强、体积小重量轻、原材料来源广、价格低廉等优点，未来在宽带互联网接入的应用可预料会非常广泛。

我国计划到 2020 年，在全国所有的城市和农村都要通宽带，这意味着宽带网络建设市场存在巨大的发展空间，光纤光缆的需求将持续保持高增长。特别是“光网城市”的建设，明确了“光纤到村”的量化目标。2015 年三家基础电信企业互联网宽带接入用户净增 1 187.1 万户，总数达到 2.12 亿户。其中，光纤接入 FTTH/O

用户总数达到1.14亿户，占宽带用户总数的比例达到53.9%。预计明年中国50%的宽带用户将是20M以上宽带（光纤宽带），80%的用户是8M以上宽带。届时将实现全市公益性机构光纤到达率100%，实现全部科技园区、工业园区、商务楼宇、宾馆酒店等商务类场所的光纤到楼、到办公室，如图1-19所示。

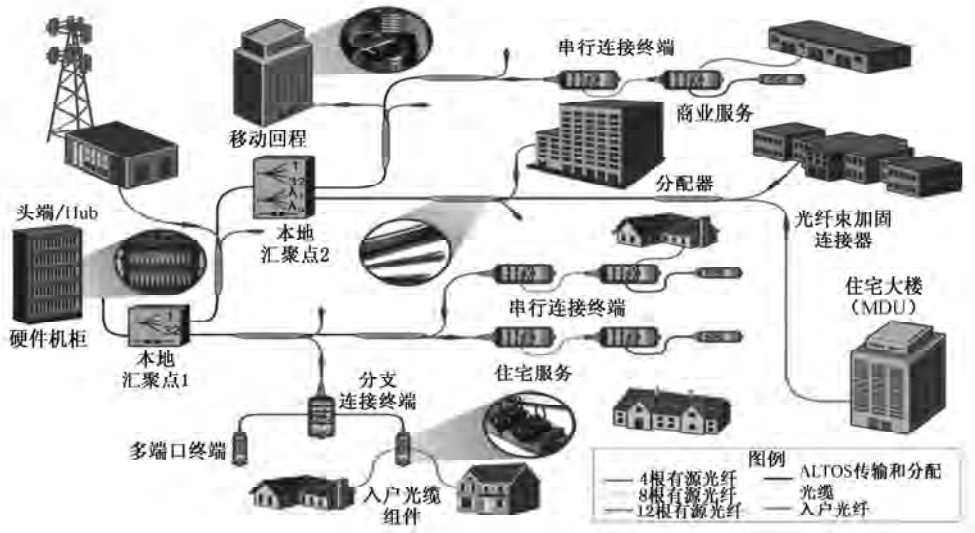


图1-19　光纤发展前景展望

这些数据都表明，中国的宽带市场蕴藏着巨大的潜力，必将是未来宽带运营商对抗的主战场之一，而光纤宽带的普及也是大势所趋。所以，未来宽带市场的竞争很大程度上是光纤宽带的竞争。