

# 光纤技术进展及其发展趋势

烽火通信 陈伟

- 摘要：回顾了**光纤**的发展历程及国内外光纤生产与应用情况，最后阐述了当前国际的光纤前沿技术。

## 0 前言

自从 1966 年**高锟**博士提出了**光纤通信**新设想以来，光纤通信获得了飞速发展：光纤通信业务从最初的简单电话语音业务发展到复杂的数据传输业务；光纤通信技术从数据传输技术发展到了图像视频传输技术；光纤通信系统从单波长**通信**系统发展到密集波分复用通信系统；光纤通信技术彻底改变了人类的生活方式，创造了一个全新的信息社会和高效融通的国际园地。1989 年建成的第一条横跨太平洋海底**光缆**通信系统拉开了海底光缆通信系统的建设序幕，促进了全球通信网的建设与飞速发展，迅速拉近了人类的空间距离，地球也从此变成了宇宙中一个较小的“地球村”。

## 1 单模光纤种类与发展进程

光纤是光纤通信的基础与核心传输媒质，光纤技术继续与呈指数趋势增长的系统容量需求同步发展。按照 **ITU-T** 标准，单模光纤从最初的 G.652 光纤发展到今天的 G.657 光纤，表 1 展示了单模光纤的种类与标准发展进程。

表 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

图 1 ITU-T 单模光纤标准种类与标准一览表

表 1 中的单模光纤，G.653、G.654、G.656 3 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。G.652 D 单模光纤是当前**光纤通信网络**的主流光纤，而 G.657 单模光纤的应用需求呈现不断增长的趋势，下面就这 2 种光纤进行重点阐述。

### 1.1 G.652 单模光纤的发展

1984 年，原 CCITT 发布了 G.652 标准的第一版。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 **MAN**、**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。

#### 1.1.1 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,国内外又有许多家公司推出了同类产品。低水峰光纤已经成为今后光纤发展的热点之一。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1625nm可将允许的长期弯曲半径减小到7.5mm,仅为标准/常规产品指标的1/4;当瞬时弯曲半径减小到5mm时,在1625nm引起的弯曲损耗为0.05dB/圈,仅为常规产品指标的1/20。在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1310~1625nm范围可将允许的弯曲半径减小到常规单模光纤的1/2,为15mm,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:AllWave 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1260~1625nm的全部可用波长范围内保持非常低的弯曲损耗,可以弯成20mm的光纤圈,该圈在1625nm引起的附加损耗<0.5dB,在1550nm引起的附加损耗<0.2dB,比CSMF的弯曲特性好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。

### 1.1.2 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850nm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850nm的最低模带宽>1000MHz·km;在850nm的衰减系数典型值为1.8dB/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850nm的带宽提高到2056.35MHz·km,在1Gbit/s速率的传输距离达到3km;在10Gbit/s速率的传输距离达到300m。以上光纤仍符合常规单模光纤标准。

### 1.1.3 开发高传输功率单模光纤

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。通过改进光纤设计,该新型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3dB,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。

## 1.2 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技术的发展和热情日益高涨。在这种形势下,ITU-T第15研究组于2006-10-30—11-10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，在光纤光缆标准方面最引人注目的成果就是通过了 G.657 新标准，该新标准为《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(1260~1625 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 2 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 7.5mm，而 A1 类光纤的弯曲半径为 10mm，两者在弯曲损耗方面的具体指标如表 2 所示。

表 2 G.657 A 类单模光纤的宏弯损耗指标对比

项 目		G.657 A1		G.657 A2		
弯曲半径/mm		15	10	15	10	7.5
弯曲圈数		10	1	10	1	1
宏弯曲损耗/dB	1 550 nm	0.25	0.75	0.03	0.1	0.5
	1 625 nm	1.0	1.5	0.1	0.2	1.0

图 2 G.657A 类单模光纤的宏弯损耗指标对比

G.657 B 又分为 B2 和 B3 2 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 5mm，而 B2 类光纤的弯曲半径为 7.5mm，两者在弯曲损耗方面的具体指标如表 3 所示。

表 3 G.657 B 类单模光纤的宏弯损耗指标对比

项 目		G.657 B2			G.657 B3		
弯曲半径/mm		15	10	7.5	10	7.5	5
弯曲圈数		10	1	1	1	1	1
宏弯曲损耗/dB	1 550 nm	0.03	0.1	0.5	0.03	0.08	0.15
	1 625 nm	0.1	0.2	1.0	0.1	0.25	0.45

图 3 G.657B 类单模光纤的宏弯损耗指标对比

G.657 光纤中，A2 类光纤由于与 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。同时，必须清醒地认识到，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。

## 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剧增。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，10Gbit/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，850nm 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，10G 以太网得到了飞速发展，最近出现了 40Gbit/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 10GbE，在 850nm(10Gbit/s)串行传输距离超过 300m。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+fiber 在 850nm(10Gbit/s)串行传输距离延长到了 550m。康宁当前有 4 种 50/125-LOMMF 产品，它们在 10G 以太网的传输距离分别是 82、150、300、550 m。对于达到 300m 的 10G-LOMMF，其价格是标准 MMF 的 1.5 到 1.8 倍；对于 eSX+fiber，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 50/125μm 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 850nm 波长 1Gbit/s 以太网系统传输链路长度达到 550m。该标准规定的光纤保留了 G.651 的许多特性，但是，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。表 4 列出了 G.651.1 与 G.651 特性的对照。

表 4 G.651.1 与 G.651 特性的对照

参数		G.651.1:07/2007	G.651:02/1998
包层直径/μm		125±2.0	125±3.0
芯直径/μm		50±3.0	50±3.0
芯/包层不同心度误差/μm		≤3.0	≤3.0
芯不圆度/%		≤6.0	≤6.0
包层不圆度/%		≤2.0	≤2.0
数值孔径/%		0.200±0.015	0.20±0.02
宏弯损耗(半径 15 mm, 2 圈)/dB	850 nm	≤1	无规定
	1 300 nm	≤1	无规定
筛选张力/GPa		≥0.69	≥0.35
谱注入带宽/(MHz·km)	850 nm	≥500	≥20
	1 300 nm	≥500	≥20
色散特性	零色散波长/nm	1 295(λ <sub>0</sub> )	≤120 ps/(nm·km) (850 nm) ≤6 ps/(nm·km) (1 300 nm)
		1 340(λ <sub>0</sub> )	
	最大零色散斜率/(ps/(nm <sup>2</sup> ·km))	≤0.105(1 295≤λ <sub>0</sub> ≤1 310 nm) ≤375×(1 590-λ <sub>0</sub> )×10 <sup>-4</sup> (1 310≤λ <sub>0</sub> ≤1 340 nm)	
衰减系数/(dB/km)	850 nm	≤3.5	≤4.0
	1 300 nm	≤1.0	≤2.0

图 4 G.651.1 与 G.651 特性的对照

从表 4 可以看出该标准突出了如下 2 点。

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

b)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：零色散波长  $\lambda_0$  要求为 1295~1340 nm；对零色散斜率进行了分段要求，对于  $1295 \leq \lambda_0 \leq 1310$  nm 的多模光纤，其最大零色散斜率  $S_{0max} \leq 0.105 \text{ps/nm}^2/\text{km}$ ，对于  $1310 \leq \lambda_0 \leq 1340$  nm 的多模光纤，其最大零色散斜率  $S_{0max} \leq 375 \times (1590 - \lambda_0) \times 10^{-6}$ 。

采用多模 OM1 光纤，在速率为 1Gbit/s 时，1000BASE-SX 的传输距离为 550m；采用 OM3 光纤，在速率为 10Gbit/s 时，其传输距离缩短为 300m，采用 OM4 光纤，40G 和 100GBASE-SR 产品的传输距离缩短为 150m。因此，随着多模传输速率的提高，OM3 光纤的需求越来越大，而 OM4 光纤也逐渐进入了应用。

高速增长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。

### • 3 我国光纤制备工艺技术的发展历程

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 (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，实现了民族光纤技术质的突破，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销量分别为 5 万 km 和 5000 皮长公里的设计能力。

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，形成了 MCVD+OVD 二步法的规模生产光纤预制棒技术。

1999 年，成立特恩驰(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 300t，折合光纤 1000 万 km，二期产能 500t，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。

a) 光纤芯棒的制造工艺技术：烽火通信具备了单模芯棒、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。

b) 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 2000~3500 km，富通、亨通和法尔胜的单棒拉丝长度也达到 2000km 以上。

c) 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 1000km 以上。

## 4 光纤前沿技术

### 4.1 光子晶体光纤技术

光子晶体光纤(PCF)具备许多独特而新颖的物理特性，如可控的**非线性**、无尽单模、可调节的奇异色散、低弯曲损耗、大模场等特性，这些特性是常规石英单模光纤所很难或无法实现的。因此，光子晶体光纤引起了国外科学界的广泛关注。随着光子晶体光纤制造工艺技术的进步，光子晶体光纤的各种指标已经取得了突破性进展，各种光子晶体光纤新产品应运而生。它不仅应用到常规光通信技术领域，而且广泛地应用到**光器件**领域，如高功率**光纤激光器**、光纤放大器、超连续**光谱**、色散补偿、**光开关**、光倍频、滤波器、波长变换器、孤子发生器、模式转换器、光纤偏振器、医疗/生物传感等领域。

光子晶体光纤具有灵活可裁剪色散特性。现已可以制造出色散平坦且具备大有效面积和无尽单模特性的光子晶体光纤。该光纤可以进行 40G 高速长途传输。超高非线性光子晶体光纤非线性系数是常规单模光纤的 100 倍以上，能够实现 1000nm 的超连续光谱，可以为 DWDM 系统提供光源，节省大量激光光源成本；同时利用非线性实现的波长变化器件，其灵活性是其他非线性光纤器件无法比拟的，可以实现超跨度波长变换。采用非线性光子晶体光纤与差频技术，可以实现微波通信，其保密功能非常强，美国已经将该新技术应用于军事领域。采用光子晶体光纤技术制造的大模场掺稀土光子晶体光纤，具备良好的抗热损伤能力，同时激光光束质量好，空气形成的内包层数值孔径较大，大大提高了激光二极管与光纤的耦合效率，实现 kW 级激光输出，在大功率切割焊接以及**激光打标**等领域具有广泛应用。利用光子晶体光纤的超高非线性效应，可以实现光速减慢，国外采用三级减慢，已经将光通信传输系统中光速减慢 1 个脉冲，国内清华大学采用国产化高非线性光子晶体光纤只一级减慢就实现了光速减慢 0.5 个脉冲，该前沿技术的研究为将来全光通信与存储奠定了良好的基础。

光子晶体光纤具有普通光纤所不具备的各种新颖特性，其在光器件领域应用远远不止这些，光子晶体光纤灵活而善变的新奇特性给科研工作者提供了更为广阔的想法与创新的空间，预示着微结构光纤将会在光通信、光器件、**光传感**等领域具有广泛的应用前景。

## 4.2 多芯光纤技术

在 2011 年的 OFC/NFOEC2011 国际会议上, 日本报道了一种 7 芯光纤, 并在该光纤上进行了光传输试验(传输速率高达 109Tbit/s、传输距离达 16.8km), 并获得成功。这创造了世界新记录, 刷新了以前最高世界记录 69.1Tbit/s。此次实验, 使用了光纤芯径间光信号泄漏大幅削减的 7 芯光纤和光纤连接装置。在技术上解决了光纤中 7 芯径间泄漏的信号互相干涉和光纤芯径连接时纤芯偏离等技术难题, 传输试验取得满意结果。该试验研究为未来多芯光纤大容量传输提供了新的技术途径与可能性。

## 5 结束语

由于全球 IP 流量的急速增长, 10G 网络的铺设量逐渐减少, 到 2015 年, 40G 和 100G 网络线卡市场销量将逐渐增大。目前, 各大网络运营商在部署 40G 光网络系统时, 采用的技术有逐渐从 DPSK/DQPSK 向 DP-QPSK 转移的趋势。传输速率和传输编码控制的变化在一定程度上将会对光纤材料提出新的要求, 如 100G 的高传输速率下可能需要更低的 PMD 的单模光纤。

面对 4G 移动通信、三网融合、物联网与云计算等新一代网络的高速崛起, 光纤将有更大的舞台与应用前景, 未来的新型光纤将会向更加高容量化、功能化与器件化的方向发展。