



用于大容量光传输系统的新型光纤

李明军¹, 陈皓²

(1. 康宁股份有限公司科学技术部 SP-AR-02-2 美国纽约州康宁 14831;

2. 康宁光通信中国公司 上海 200233)

摘要:多媒体和数据应用程序的快速扩展,驱动骨干网的带宽需求量以前所未有的速率增长。骨干容量增长的同时也给数据中心的带宽和互联带来了更多的挑战。目前光纤制造厂商正不断改善光纤的性能,以满足长途和短距离应用的需求。短期内通过改进传统光纤技术虽然可增加系统容量,但研究表明,单模光纤的传输容量正快速接近香农理论极限。采用空分复用的光纤技术可以克服该限制,为未来的容量增长提供新的解决方案。在本文中,将讨论提高光纤传输系统容量的新型光纤。对应用于长途传输的常规光纤而言,先进的数字信号处理可对色散和偏振模色散等损伤进行完全补偿,因此光纤的衰减和有效面积成为可进一步优化的参数,讨论以上两个参数的品质因数,总结超低损耗和大有有效面积光纤的最新研究成果。对于短距离应用,回顾提高多模光纤带宽的方法,讨论多模光纤的发展趋势。对于下一代光纤,重点研究可实现空分复用技术的多芯和少模光纤,该技术可增加系统容量一个数量级。阐述多芯和少模光纤的设计思路,总结该技术的最新进展,最后讨论使用多芯和少模光纤所面临的主要挑战。

关键词:超低损耗光纤;大有有效面积光纤;空间复用;多芯光纤;少模光纤

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.06.001

Novel Optical Fibers for High-Capacity Transmission System

Li Mingjun¹, Chen Hao²

(1.Science and Technology Division, Corning Incorporated, SP-AR-02-2, Corning, New York 14831, United States;

2. Corning Optical Communication China, Shanghai 200233, China)

Abstract: Novel optical fibers for increasing capacity for transmission system was discussed. For conventional fibers for long haul transmission, because transmission impairments such as chromatic dispersion, polarization-mode dispersion can be perfectly compensated for by digital signal processing, the only fiber parameters that can be optimized further are fiber attenuation and effective area. System figure of merit for the two parameters was discussed and recent results on ultra-low loss and large effective area fibers were presented. For short reach applications, the current efforts in improving multimode fiber bandwidth were reviewed and new trends in multimode fibers to meet future bandwidth demand were discussed. For next generation fibers, multicore and few mode fibers for space division multiplexing would be focused on, which has the potential to increase the capacity by an order of magnitude. Fiber design considerations were presented and recent progress on multicore and few mode fibers was reviewed. Finally, major challenges in space division multiplexing applications using multicore and few mode fibers were discussed.

Key words: ultra-low loss fiber, large effective area fiber, space division multiplexing, multicore fiber, few mode fiber



1 引言

自 1970 年第一根损耗低于 20 dB/km 的光纤面世以来^[1], 光纤和传输系统在过去的 40 多年得到迅速发展。光纤、器件和系统技术都极大地增加了传输容量。数据显示, 单根光纤的传输容量每 4 年就会增加大约 10 倍^[2]。

长距离传输系统经历了 4 个发展阶段。第一代光纤通信系统采用多模光纤(MMF)和波长为 850 nm 的 LED 光源^[3]。多模光纤的优点是纤芯较大且数值孔径较高, 可以方便地把信号光源耦合进光纤, 光纤直接连接和熔接相对容易。但多模光纤的模间色散限制了传输带宽。

消除模间色散的一种方法是用单模光纤代替多模光纤。20 世纪 70 年代后, 随着半导体激光器的发展^[4,5], 光纤长波长传输窗口的应用^[6,7]以及单模光纤熔接技术的进步^[8,9]使得单模光纤传输系统成为可能。第二代光纤通信系统采用标准单模光纤和 1 310 nm 波长的单模激光器, 标准单模光纤在 1 310 nm 波长区域的衰减比 850 nm 波长小, 它的另一个优势是色散几乎为 0^[10-14]。

单模光纤的工作窗口中衰减最低在 1 550 nm 波长, 但该波长窗口中的色散非常大(+17 ps/(km·nm)), 限制了高速率系统的传输距离。为充分利用该窗口衰减最低这一优势, 光纤厂商开发了一种新型光纤, 即色散位移光纤(DSF), 该光纤实现了 1 550 nm 波长区域最小的色散值^[15-21], 可以使用光谱宽度为数纳米的激光器, 从而实现了工作波长为 1 550 nm 的第三代光纤传输系统。

色散位移光纤在 1 550 nm 附近优化了色散参数以满足单信道传输要求。在该光纤被广泛应用于实际通信系统之前(20 世纪 80 年代后期), 掺铒光纤放大器(EDFA)^[22,23]和波分复用(WDM)^[24]技术的出现使多信道传输的第 4 代大容量光纤传输系统成为可能。很快人们就发现, 色散位移光纤的色散值在 1 550 nm 时不适合波分复用传输^[25], 这是因为四波混频的非线性效应在色散为零时最强^[26], 导致两个相邻信道间的串话干扰非常强烈。为减少四波混频效应, 需要有一定数量的色散。另一方面, 色散应该尽量小, 以减少色散对传输的限制, 因此提出了非零色散位移光纤(NZDSF)的概念^[27-30]。非零色散位移光纤在 1 550 nm 处的典型色散值为 3~8 ps/(km·nm), 有效面积约 50 μm^2 。由于非线性效应与光纤有效面积成反比, 增加光纤有效面积可减少非线性效应, 因此光纤厂商通过优化光纤折射率分布, 设计开发出有效面积约为 72 μm^2 的大有效面积光纤^[31-34]。

目前, 非零色散位移光纤已经被广泛敷设在全球大容量波分复用网络中。

波分复用技术通过增加波长信道数量来增加传输容量, 提供了一种扩展系统容量的新方法。在波分复用技术发展的同时, 信道速率也在不断提高以满足日益增长的带宽需求。使用强度调制和直接检测技术, 信道速率可以从 2.5 Gbit/s 提高到 10 Gbit/s, 最高可以实现 40 Gbit/s。随着信道速率的不断提高, 相干通信技术近年来受到大量关注^[35]。相干检测允许进行两个自由度的信息编码, 从而增加每个信道的信息量。它还把数字信号处理(DSP)功能集成到相干接收机中成为数字接收机。基于相干检测技术, 发展出很多先进的调制格式^[36], 如二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)、8 位相移键控(8PSK)、16 位正交振幅调制(16QAM)和更高等级的调制格式, 实现单信道容量超过 100 Gbit/s。数字信号处理和相干检测可以补偿对色散和偏振模色散带来的损伤, 该技术已经改变了光纤设计方向, 使光纤向更低损耗和更大有效面积的方向发展, 以减少非线性传输损伤。

短期内可以通过改进传统光纤技术来增加系统容量, 但研究表明, 单模光纤的传输容量正在接近香农理论极限^[37]。采用空分复用(SDM)技术可克服这一限制, 为未来光纤的容量增长提供新的解决方案^[2]。实现空分复用的方法有两种: 一种是使用多芯光纤(MCF), 另一种是使用少模光纤(FMF)。空分复用为光纤传输系统提供了一个新的发展方向, 有可能使系统容量增加一个数量级。用于空分复用系统的多芯光纤和少模光纤是当前光纤研究的热点。

虽然多模光纤在长距离传输中被单模光纤所取代^[38], 但它仍然是短距离数据网络应用的首选, 因为多模光纤降低了光源成本, 提供了光纤熔接和连接之间的高效耦合。在过去的 10 多年中, 多模光纤和 850 nm 的垂直腔面发射激光器(VCSEL)已成为短距离高速率数据网络^[39,40]中的主导技术。多模光纤一般应用于局域网(LAN)和数据中心, 提供比铜缆更高的传输数据速率或更远的传输距离, 同时, 价格便宜的 VCSEL 光源使整个系统的成本降低。多模光纤应用的快速增长得益于计算机连接、数据存储和本地通信的发展, 包括链接到互联网的高速率数据要求。目前, 服务器虚拟化、云计算和速度更高的端口使数据中心网络速率达到 40/100 Gbit/s, 甚至会达到 400 Gbit/s。多模光纤一直在改善其带宽性能, 以满足更高速率和更长传输距离的需求。

本文将主要研究新型光纤在增加长途和短途传输系统容量方面的发展情况。首先讨论超低损耗和大有效面积光纤在高容量长途波分复用系统中的应用,然后介绍多模光纤在大容量短途应用中的最新发展,最后讨论使用空分复用技术增加光纤容量的新型多芯光纤和少模光纤。

2 用于长途系统的超低损耗和大有效面积光纤

相干检测和数字信号处理技术的发展可补偿光纤色散引起的传输损伤,使得光纤衰减和有效面积成为大容量长途传输光纤的关键技术参数,这也极大地简化了光纤的设计。

光纤的衰减包括本征损耗(如瑞利散射 α_{RS} 、红外吸收 α_{IR} 以及紫外吸收 α_{UR})和附加损耗(如过渡金属吸收 α_{TM} 、OH 离子吸收 α_{OH} 以及波导缺陷导致的散射 α_{IM} 和光纤弯曲导致的损耗 α_{BL}),计算式表示如下:

$$\alpha = \alpha_{\text{RS}} + \alpha_{\text{IR}} + \alpha_{\text{UR}} + \alpha_{\text{TM}} + \alpha_{\text{OH}} + \alpha_{\text{IM}} + \alpha_{\text{BL}} \quad (1)$$

光纤预制棒生产过程中使用高纯化学材料的化学气相沉积技术,可以基本消除过渡金属导致的污染,使用氯气干燥可以将 OH 离子的浓度降至最低。波导缺陷损耗是由纤芯和包层边界的几何尺寸波动引起的,此波动主要来自制造过程中产生的残余应力。而残余应力又取决于纤芯和包层之间的粘度差异以及光纤拉丝过程中的张力,减小纤芯和包层之间的粘度差异可以降低应力^[41]。对于光纤的本征损耗,最重要的是瑞利散射损耗。瑞利散射损耗 α_{RS} 与密度波动 α_p 和浓度波动 α_c 二者相关^[42]:

$$\alpha_{\text{RS}} = \alpha_p + \alpha_c \quad (2)$$

密度波动 α_p 取决于假设温度 T_f (假设温度是指玻璃和过冷却液二者结构相同时的温度),计算如下:

$$\alpha_p = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_T k_B T_f \quad (3)$$

其中, λ 为入射光波长, p 为光弹系数, n 为折射率, k_B 为玻耳兹曼常数, β_T 为等温压缩系数。浓度波动 α_c 用式(4)表示:

$$\alpha_c \sim \left(\frac{\partial n}{\partial C} \right)^2 \langle \Delta C^2 \rangle T_f \quad (4)$$

由于瑞利散射主要由冷却时的密度波动引起,与假设温度 T_f 成正比。需要尽可能减少 T_f 以减小瑞利散射,增加结构弛豫。因为瑞利散射损耗与 GeO_2 浓度成正比,降低纤芯处的 GeO_2 掺杂水平可以减少浓度波动,因此纤芯最好

使用纯二氧化硅材料^[43,44]。

光纤宏弯和微弯损耗是影响光纤衰减的重要因素,对于大有效面积的光纤更为明显。为在增加有效面积的同时保持良好的弯曲性能,需要精心设计纤芯折射率剖面。有效面积、光缆截止波长和弯曲损耗是光纤设计时需主要考虑的 3 个因素。图 1 显示了可用于低损耗和大有效面积光纤的 3 个剖面结构。

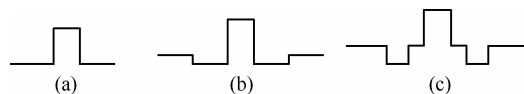


图 1 大有效面积光纤的折射率剖面结构

首先通过最简单的阶跃折射率设计来理解这些参数的相互关系,该设计的大致思路如图 1(a)所示。阶跃折射率剖面结构主要有两个参数:相对折射率变化(纤芯)和纤芯半径。为增加有效面积,需要增加纤芯半径,但同时必须减少纤芯,以保持光缆截止波长低于最小工作波长,如 1 550 nm 工作窗口的截止波长为 1 530 nm。由于光缆截止波长的限制,当有效面积增大时,弯曲损耗也会增加。宏弯损耗通常会指定一个上限,如直径 60 mm 的光纤绕 100 圈时附加损耗小于 0.5 dB,或者根据特定需求的其他弯曲直径下的弯曲损耗。对于阶跃折射率结构而言,受光缆截止波长和宏弯损耗的限制,可以实现的光纤最大有效面积约为 110 μm^2 。

为了进一步增加有效面积,可采用如图 1(b)和图 1(c)所示结构,在光缆截止波长低于 1 530 nm 的同时,采用下陷包层或低折射率沟槽(trench)以抑制宏弯损耗。图 2 所示为图 1(b)所示结构在 1 550 nm 时测得的弯曲损耗与有效面积的关系。当弯曲直径为 30 mm 时,弯曲损耗在有效面积大于 130 μm^2 时开始迅速增加,而对于 40 mm 的弯曲直径,有效面积达到 175 μm^2 时弯曲损耗才会开始增加。

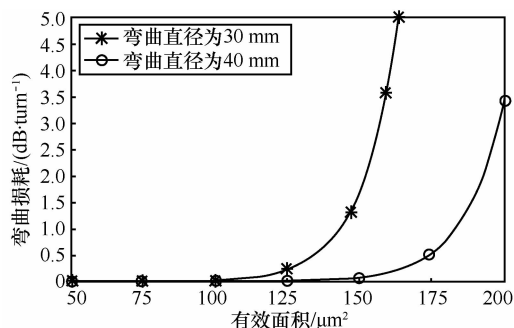


图 2 图 1(b)所示结构的光纤弯曲损耗与有效面积的关系



微弯损耗是限制光纤有效面积的另一个因素^[45]。如果使用标准单模光纤(G.625)的涂层,根据参考文献[46],由于微弯损耗增加,有效面积最大只能为 $120 \mu\text{m}^2$ 。微弯损耗是波导上高频纵向扰动引起的衰减,这种扰动使纤芯中基模的能量耦合达到包层高阶模,并消失在外部介质中^[47]。Olshansky 把玻璃和涂层作为一个复合系统,总结出微弯损耗与如下因素相关^[48]:

$$\gamma_{\text{micro}} \propto \frac{a^4}{b^6 \Delta^3} E^{3/2} \quad (5)$$

其中, a 为纤芯半径, b 为包层半径, Δ 为纤芯的相对折射率, E 为玻璃外面涂层的弹性模量。前面提到纤芯 Δ 和纤芯半径是由有效面积和截止波长决定的,这两个变量并不完全独立,加在一起对微弯灵敏度的降低作用有限。因此内涂层的模量成为减小大有效面积光纤微弯灵敏度的关键因素。使用更软的内涂层可改善外部扰动对玻璃部分的缓冲,提高微弯性能。

涂层模量对微弯的缓冲作用已通过实验得到证实。在实验中,不同有效面积的光纤都试验两个涂层,内涂层模量分别为 0.43 和 0.13(涂层 A 和 B)。测得的光纤衰减如图 3 所示。当有效面积为 $110 \sim 115 \mu\text{m}^2$ 时,两个涂层的光纤衰减值是相同的。这表明,当有效面积小于 $115 \mu\text{m}^2$ 时为本征衰减。当有效面积大于 $120 \mu\text{m}^2$ 时,涂层 A 中的微弯损耗开始增加,而对于涂层 B,直到有效面积达到 $135 \mu\text{m}^2$,其微弯损耗几乎仍保持在 0 的水平。因此对于大有效面积光纤,要获得超低的衰减,需要采用模量优化的内涂层以减少微弯损耗。据测算,通过内涂层的进一步优化,有效面积将有可能达到约 $150 \mu\text{m}^2$ 。

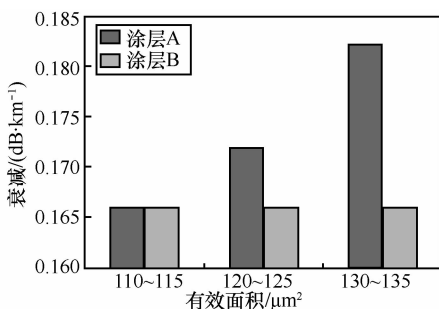


图3 不同有效面积和不同涂层的光纤衰减

传输系统中的光信噪比(OSNR)受光纤有效面积和衰减的影响。系统链路中的光信噪比取决于各信道发射功率、光学放大器的噪声因数、每跨距损耗以及链接中的跨

距总数。与光纤参数直接相关的是信道发射功率和跨距损耗。信道发射功率受光纤非线性损伤的限制,和光纤有效面积 A_{eff} 与非线性折射率 n_2 的比值相关。跨距损耗与光纤衰减系数 α 直接相关。为了量化大有效面积和低损耗优点给 OSNR 带来的优势,引入光纤品质因数(FOM),定义如下^[49]:

$$FOM(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{A_{\text{eff}} \cdot n_{2,\text{ref}}}{A_{\text{eff,ref}} \cdot n_2} \right) - (\alpha - \alpha_{\text{ref}}) \cdot L - 10 \log \left(\frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{eff,ref}}} \right) \quad (6)$$

其中, A_{eff} 、 α 、 n_2 和 L_{eff} 分别为光纤的有效面积、衰减系数、非线性折射率和有效长度,而 $A_{\text{eff,ref}}$ 、 α_{ref} 、 $n_{2,\text{ref}}$ 和 $L_{\text{eff,ref}}$ 则分别为参考光纤的有效面积、衰减系数、非线性折射率和有效长度, L 为跨距。

图4显示了跨距为75 km时,与有效面积 A_{eff} 与衰减系数 α 关联的光纤品质因数等高线图^[49]。图4中的灰色小圆圈代表参考光纤的参数。此处的参考光纤为典型的标准单模光纤,其衰减值为0.2 dB/km,有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 。从图4中可观察到,在0.179 dB/km和0.178 dB/km之间出现不连续现象,这是因为只有纯硅纤芯光纤,而不是传统的掺锗光纤才能实现衰减小于或等于0.178 dB/km,这两种光纤的非线性折射率 n_2 不同。图4表明,通过增加光纤有效面积或减小光纤衰减可实现较高的光纤品质因数。以这个75 km跨距为例,降低衰减至0.162 dB/km、增大有效面积至 $145 \mu\text{m}^2$ 的超低损耗光纤可实现品质因数增加超过5 dB。对于较长的跨距或无中继链路,超低损耗显得更为重要。分析表明,相对于有效面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 的参考光纤,衰减减少量为-0.035 dB/km,等效于跨距分别为50 km、75 km及100 km所对应光纤的有效面积需要分别增加 $34 \mu\text{m}^2$ 、 $55 \mu\text{m}^2$ 和 $83 \mu\text{m}^2$ 。

光纤品质因数可以量化超低损耗和大有效面积光纤的优势,近年一些100 Gbit/s的传输实验也演示了这些光纤的性能^[49-55]。表1总结了7个实验。在这些实验中,所用光纤的衰减值为0.16~0.17 dB/km,有效面积为 $80 \sim 146 \mu\text{m}^2$ 。参考文献[49]中研究了跨距为365 km的无中继通信系统,在其他实验中,跨距为50~200 km。参考文献[50,52]使用了有效面积管理方法,将有效面积较大的光纤放在各跨距的输入端以减少非线性,将较小有效面积光纤放在各跨距的输出端以提高拉曼放大的效率。最大长度为3 000~10 200 km的传输距离在实验中得到了验证,该链路长度可满足陆地和海底传输的需求。这些实验结果展示了光纤性能对提高系统传输距离和系统性能的重要作用。

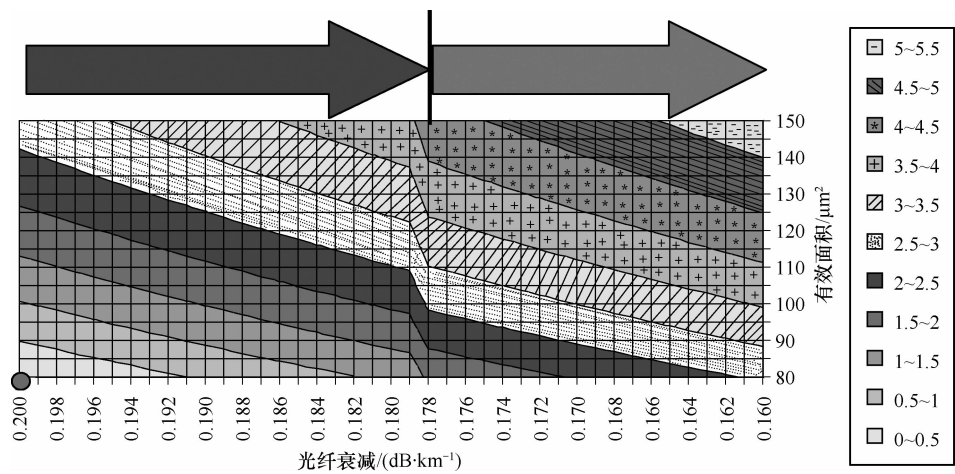


图 4 跨段长度为 75 km 时的光纤品质因数等高线图

表 1 低损耗和大有效面积的光纤传输实验

光纤		系统								参考文献
$\alpha/(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	跨距/km	放大器	速率/ (Gbit·s ⁻¹)	调制格式	信道 编号	信道间隔/ GHz	最大长度/ km	总容量/ (Tbit·s ⁻¹)	
0.163	76~128	365	EDFA/Raman	112	PM-QPSK	40	50	365	4	[50]
0.162	134	100	EDFA	112	PM-QPSK	16	50	7 200	1.6	[51]
0.165	85, 134	200	EDFA/Raman	112	PM-QPSK	8	50	5 400	0.8	[52]
						32		6 000	3.2	
0.161	112	50	EDFA	112	PM-QPSK	80	50	9 000	8	[53]
0.160	112,146	60.6	EDFA	120.5	PDM-8QAM-OFDM	115	25	10 181	11.5	[54]
0.17	80	125	EDFA	112	PDM-QPSK	1	50	3 000	0.26	[55]
				42.8	CRZ-DQPSK	4				
0.162	112	100	Raman	112	PM-QPSK	40	50	10 200	4	[49]

3 用于短距离通信的新型多模光纤

快速增长的互联网络流量要求通过数据中心、超级计算机和电子消费产品对海量信息进行高速传输和存储。这些应用的距离较短,从几米到几百米不等,多模光纤是低系统成本解决方案的首选。日益增加的数据流量对多模光纤的带宽需求也越来越高,同时,系统又要求多模光纤具有较低的弯曲损耗,以提高功耗冗余、空间利用率、散热效率和整体连接以及线缆管理。在本节中,将回顾多模光纤的发展并讨论高速率多模光纤新趋势^[40]。

3.1 850 nm 的高带宽多模光纤

多模光纤设计采用 Δ 剖面以减少模式群时延,实现高带宽:

$$\Delta = \Delta_0 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha \right] \tag{7}$$

其中, r_0 为纤芯半径, Δ_0 为纤芯的最大相对折射率变

化,可以表示如下:

$$\Delta_0 = \frac{n_0^2 - n_1^2}{2n_0^2} \tag{8}$$

其中, n_0 为纤芯的中心折射率, n_1 为包层的折射率。
当选择合适的 α 值时,多模光纤的模式带宽可以在一定波长范围内进行优化^[56]。图 5 所示为 50 μm 多模光纤在

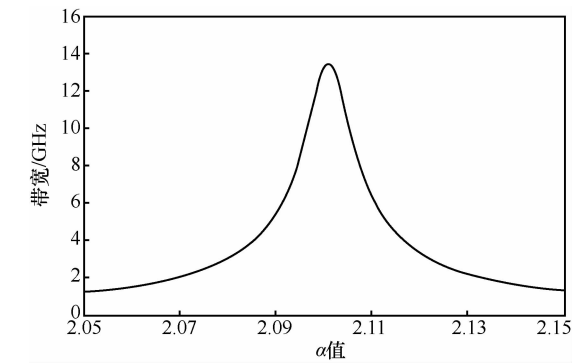


图 5 50 μm 多模光纤在 850 nm 波长 α 值变化 1% 时的带宽分布



850 nm 波长 α 值变化 1% 时的带宽分布。对于这种光纤,其理论峰值带宽超过 $13 \text{ GHz} \cdot \text{km}$ 。然而如图 5 所示,带宽对 α 值非常敏感。在制造过程中纤芯剖面存在的各种缺陷会限制实际带宽。

由于光纤制造工艺和设计方面的进步,多模光纤的带宽得到了大幅提升,以满足新的带宽需求。表 2 为不同类型的标准多模光纤。 $62.5 \mu\text{m}$ 的多模光纤具有较高的数值孔径和较大的纤芯,可使更多发光二极管光源耦合进光纤,在短距离应用中,可以支持 10 Mbit/s 乃至 100 Mbit/s 的速率下 2 km 的数据传输,相当于 20 世纪 90 年代初的“快速以太网”标准。在 20 世纪 90 年代中期,随着 1 Gbit/s 的光纤以太网标准和低成本的 850 nm VCSEL 的发展,芯径为 $50 \mu\text{m}$ 光纤的多模光纤更受欢迎。该光纤的折射率差更低,因此具有更低的模式色散和更高的带宽,由于 VCSEL 具有更小的光斑尺寸和更低的数值孔径,将激光耦合到 $50 \mu\text{m}$ 光纤不再是一个难题。因此, $50 \mu\text{m}$ 光纤已成为 1 Gbit/s 和 10 Gbit/s 以太网应用的首选光纤。 $50 \mu\text{m}$ 多模光纤从 OM2 ($500 \text{ MHz} \cdot \text{km}$) 发展至 OM3 ($2\,000 \text{ MHz} \cdot \text{km}$), 现在已发展为 OM4 ($4\,700 \text{ MHz} \cdot \text{km}$)。通过更严格的剖面控制可以实现带宽的改善,这需要进一步优化光纤制造过程。

纤芯 Δ_0 对可以实现的最大带宽也有影响,因为带宽与 $1/\Delta^2$ 成正比,如图 6 所示。当纤芯 Δ_0 从 1% 降至 0.75% 时,带宽将会加倍。但是,降低纤芯 Δ_0 会加大弯曲损耗。这个问题可以通过减小纤芯直径并在包层中使用低折射率

沟槽来解决,下节将详细讨论这个问题。

对于使用 850 nm 多模 VCSEL 的传输系统而言,超过 OM4 多模光纤带宽的意义不大,因为该系统会受到色散的限制。对于多模 VCSEL,可以通过设计略微向左倾斜的差分模式时延(DMD)多模光纤补偿部分色散^[57],或利用短的多模光纤跳线补偿差分模式时延倾斜^[58],后者灵活性更好,可适用于不同色散特性的 VCSEL。为获得比 OM4 更高的带宽,可以使用 850 nm 单模 VCSEL^[59]或工作在色散更低的长波长区域。

3.2 弯曲不敏感多模光纤

数据中心的应用中,更倾向于使用弯曲不敏感多模光纤,因为它可以改善电源功耗冗余,优化设计光缆、硬件和设备,以节约更多的空间,频繁更换时更便捷,具有更好的冷却效率以及更方便的整体连接和线缆管理。

如图 7 所示为一个弯曲不敏感多模光纤的折射率剖面设计^[60]。纤芯为渐变折射率,包层有一个低折射率沟槽。沟槽减小了包层区域模式的光功率,从而提高了其弯曲性能。纤芯 Δ 和沟槽大小都经过精心设计,以平衡弯曲性能及与标准多模光纤的兼容性。沟槽的位置对实现高带宽非常重要,合适的位置可以纠正外模群时延。通过合理设计纤芯和沟槽,高带宽 OM4 多模光纤可以实现低弯曲损耗。如图 8 所示为 850 nm 波长处测得的弯曲损耗对比,弯曲不敏感多模光纤的弯曲损耗比不加沟槽的标准多模光纤低了 10 倍以上。

表 2 不同类型多模光纤的带宽和链路距离

光纤	纤芯 Δ_0	纤芯直径/ μm	多模满注入带宽/ $\text{MHz} \cdot \text{km}$		有效模式带宽/ $\text{MHz} \cdot \text{km}$	850 nm 链路距离/m			
			850 nm	1 310 nm		1 Gbit/s	10 Gbit/s	40 Gbit/s	100 Gbit/s
OM1	2%	62.5	200	500	N/A	275	33	N/A	N/A
OM2	1%	50	500	500	N/A	550	82	N/A	N/A
OM3	1%	50	1 500	500	2 000	N/A	300	100	100
OM4	1%	50	3 500	500	4 700	N/A	550	150	150

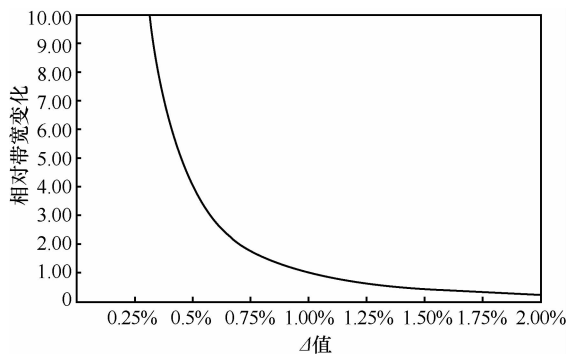


图 6 多模光纤的相对带宽随纤芯相对折射率的变化曲线

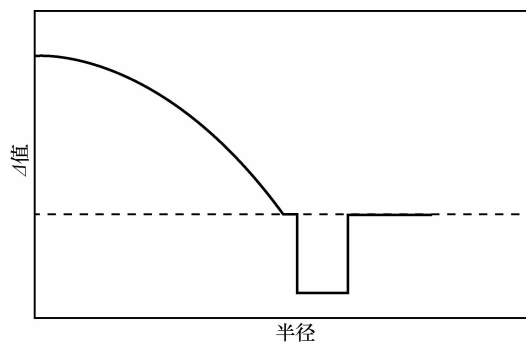


图 7 弯曲不敏感多模光纤的折射率剖面示意

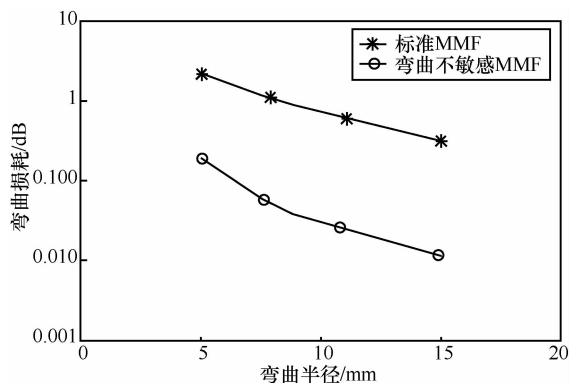


图8 标准多模光纤和弯曲不敏感多模光纤在850 nm的弯曲损耗

3.3 长波多模光纤

随着850 nm多模光纤的带宽达到OM4水平,因光收发器使用的VCSEL的线宽较大,色散成为高速率和长链路的限制因素。有两种方法可以增加速率或距离:使用单模光纤,或仍使用850 nm多模光纤,但采用长波长单模激光器,以限制进入850 nm多模光纤的模式^[6]。缺点是激光到光纤的耦合过程需要高对准精度,将导致高封装成本,提高了光学收发器的成本。

一种解决方案是使用长波长优化的高带宽多模光纤(980 nm/1 060 nm或1 310 nm)与长波光源结合(如长波VCSEL),集成硅光子(SiPh)收发器。长波多模光纤系统保留了常规850 nm多模光纤低耦合损耗和无源对准的优点。同时该光纤的色散和衰减在长波长处更低。图9更明显地展示了这一点,展示了色散和损耗随波长的变化。在1 060 nm波长处色散和损耗都减少了2倍以上;1 310 nm时色散几乎为0,而损耗仅是850 nm时的1/5。低损耗和低色散的高带宽光纤可实现更高的速率和更长的传输距离。近年来已经实现了多个25 Gbit/s的传输系统,通过850 nm多模光纤与1 310 nm硅光子收发器结合(820 nm)^[62],或通过多模光纤与1 060 nm VCSEL收发器的结合(超过500 m)^[63]而实

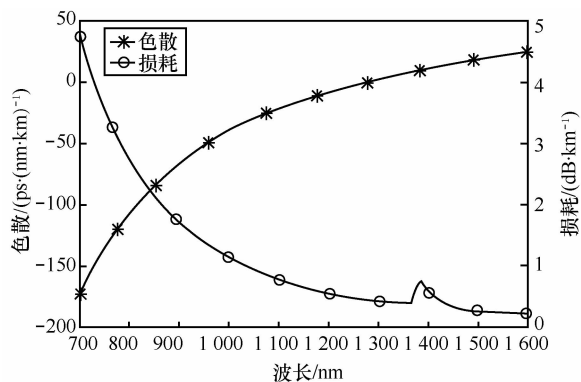


图9 多模光纤的色散和损耗

现,这些都表明了长波多模光纤的传输优点。

3.4 多模光纤的用户应用和短距离网络

光纤到户(FTTH)的日益发展,给光通信带来了短距离消费电子连接或家庭网络方面的新机会。对于光纤设计而言,用户互联是一种全新的应用领域,与传统数据中心之类的应用相比有很多不同的要求。此类应用除了带宽外,光纤的总损耗即使在未完全对准的情况下也能保证最小,这样可以使用廉价的光学元件和低成本装配过程,因此要求光纤进一步降低弯曲损耗,并在小半径弯曲条件下也能保证有较高的机械可靠性。

增加光纤的纤芯直径和数值孔径有利于提供失配容限。通过对850 nm VCSEL的10 Gbit/s^[64]的高速连接的大量分析(如图10所示),当数值孔径增加到约0.3且纤芯直径增加到约80 μm 时,连接损耗发生明显改善。进一步增加纤芯直径或数值孔径的作用却非常小,这是因为,虽然发射机和连接器中的耦合得到改进,但当聚焦光会聚于光电二极管接收机上时,耦合效率会降低。当纤芯直径为80 μm 且数值孔径为0.3时,总链路损耗约为6.2 dB;而使用50 μm 纤芯直径和0.2数值孔径的标准多模光纤,其总链路损耗则为11.5 dB。

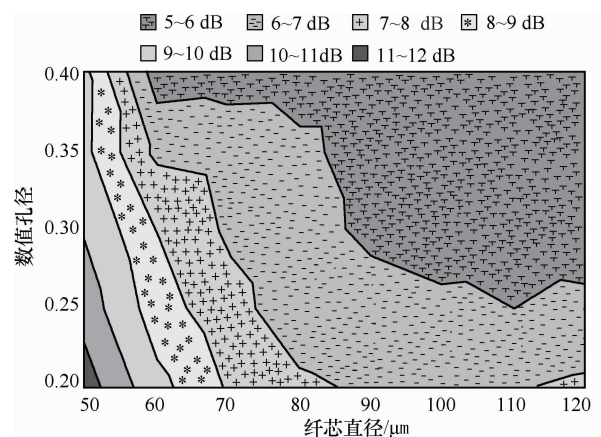


图10 未对准条件下的光学链路损耗

为了使光纤能承受用户操作要求,尤其是在约3 mm直径瞬态短期急弯条件下,小直径的光纤设计可以减小弯曲处施加的应力,增加几个量级的使用寿命。研究表明,弯曲直径为3 mm时,100 μm 光纤的使用寿命相比125 μm 光纤提高了约4个量级。

高数据传输速率需要光纤具有渐变的折射率纤芯,因为阶跃折射率纤芯不能达到足够高的带宽和支持大于10 Gbit/s的长距离传输。在包层中加入一个低折射率沟槽有利于同



时实现高带宽和低弯曲性能,如第3节讨论所示。2%的纤芯 Δ 结合低折射率沟槽,可实现3 mm弯曲直径的损耗降低到1 dB量级,已经实现在50 m链路上10 Gbit/s的传输功率损失小于1 dB^[64]。

4 光纤的空分复用系统

空分复用(SDM)是满足未来容量增长的重要方式。然而,传统的单模或多模光纤并不适合于这种应用。需要开发如多芯光纤(MCF)和少模光纤(FMF)的新型光纤。本节将讨论两种类型的光纤,总结应用这种光纤的空分复用技术的最新进展。

4.1 少模光纤

多模光纤的模分复用(MDM)不是一个新概念。在光纤发展初期,就已经认识到使用不同模式进行独立信道传输的可能性。首次模分复用的展示是通过常规多模光纤进行了10 m的短距离传输,这么短的距离主要是受到模式耦合的限制^[65]。无线通信中多输入多输出(MIMO)系统的成功应用,推动了MIMO在光纤通信中的研究进展^[66]。多输入多输出技术能够解决模式耦合问题,增加传输距离和容量,但需要更复杂的解码技术和数字信号处理能力。传统50 μm 纤芯直径1%纤芯 Δ 的多模光纤有100多个模式,如进行长距离传输需要复杂的数字信号处理。目前研究工作一直集中在少模光纤传输系统上。对于少模光纤传输,差分模式群时延(DMGD)越小越好,以降低解码复杂度。同时使用大有效面积光纤也可以减小非线性影响。

如图11所示为少模光纤的折射率剖面结构。图11(a)为阶跃折射率结构,图11(b)为渐变折射率结构。这两种结

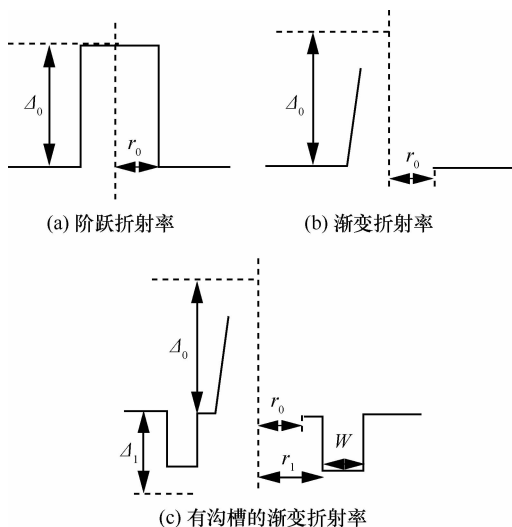


图11 少模光纤的剖面结构

构可以通过式(7)所述的 α 剖面函数进行说明。对于阶跃折射率剖面, α 值趋于无限。阶跃折射率的设计很简单,模数由纤芯 Δ_0 和纤芯半径 r_0 确定,但很难把一根光纤的C波段和L波段设计成小DMGD。渐变折射率剖面具有形状因子 α ,增加了一个自由度。通过控制 α 值,可获得较低的DMGD^[67]。为了改善光纤的弯曲性能,可以在包层中加入低折射率沟槽,如图11(c)所示。低折射率沟槽不仅可以降低光纤的弯曲损耗,如果对沟槽位置进行优化,也可以减少外部模式群时延,其原理和参考文献[60]中所述的弯曲不敏感多模光纤一样。

采用渐变折射率剖面设计结构,理论上可以得到非常低的DMGD,如图12所示为不同纤芯 Δ 值下最优 α 剖面设计对应的DMGD的均方根值(RMS)。由图可见,在整个C+L波段,WDM窗口差分模式群时延还不到10 ps/km。举例来说,表3中列出的光纤0,波长为1 500~1 600 nm时,DMGD低于1 ps/km。对于3-LP模式的光纤,其DMGD低至50 ps/km^[69,70],而对于6-LP模式的光纤,报道的DMGD低于85 ps/km^[71,72]。

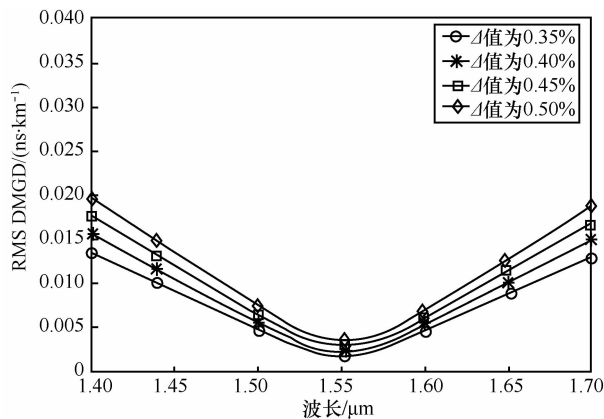


图12 最优 α 剖面设计对应的DMGD的均方根

除了非常低的时延外,从表3还可以看出,LP₀₁和LP₁₁的有效面积都非常大。LP₀₁的有效面积为177 μm^2 ,LP₁₁的有效面积为238 μm^2 。尽管有效面积比单模光纤大得多,在实际应用中却具有理想的弯曲特性,因为LP₁₁的截止波长大约为4 μm ,对于长距离传输,大的有效面积有利于降低非线性效应。

在少模光纤链路中实现低DMGD的另一种方法是采用如图13所示的DMGD管理方式,将具有正DMGD和负DMGD的少模光纤串联,以获取超低的DMGD。通过更改渐变折射率剖面设计的 α 值设计正DMGD和负DMGD。

表 3 光纤光学特性设计实例

光纤	1 550 nm 的 LP ₀₁ MFD/ μm	1 550 nm 的 LP ₀₁ 有效面积/ μm^2	LP ₀₁ 色散/(ps·(nm·km) ⁻¹)	LP ₁₁ 截止波长/ μm	1 550 nm 的 LP ₁₁ 有效面积/ μm^2	LP ₁₁ 色散/(ps·(nm·km) ⁻¹)	1 500 nm 的 DMGD/(ps·km ⁻¹)	1 550 nm 的 DMGD/(ps·km ⁻¹)	1 600 nm 的 DMGD/(ps·km ⁻¹)	1 550 nm 的 DMGD 斜率/(ps·(nm·km) ⁻¹)
0	15.0	177	21.0	4.085	238	21.1	-0.76	0.39	0.68	0.019 1
1	15.3	186	21.2	4.178	242	21.4	0.101 2	0.105 7	0.109 4	0.061 23
2	14.7	168	20.9	3.976	234	20.8	-0.124 3	-0.126 9	-0.130 4	-0.043 63

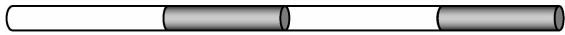


图 13 DMGD 管理的光纤链路

如图 14 所示为两种光纤对应的差分模式群时延和波长的关系。表 3 列出了这两种光纤的光学特性(光纤 1 和光纤 2)。这两种光纤具有相反的时延和时延斜率。通过将两种光纤的长度比例选择为 1.2:1 的方式,可构建一个时延几乎为 0 的光纤链路。例如,如果将光纤 1 的长度设为 552 km,将光纤 2 的长度设为 460 km,这个长度大约为 1 000 km 的光纤链路,在整个波长为 1.5~1.6 μm 范围可实现低于 0.5 ps/km 的净时延。

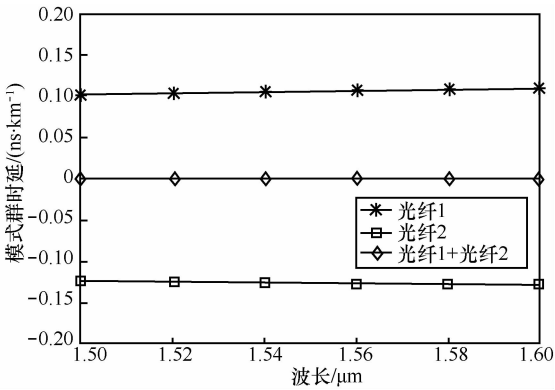


图 14 具有正负差分模式群时延的光纤样品

差分模式集群时延补偿也可进行实验验证^[68]。如图 15 所示为 4 种不同折射率结构的光纤(A 至 D)的 DMGD 值。4 种光纤的长度分别为 10 km、18 km、22 km 和 50 km。光纤 A 和 B 具有正的 DMGD 和负的 DMGD 斜率,光纤 C 有负的 DMGD 和正的 DMGD 斜率,光纤 D 的目标是实现 DMGD 值为零,但测量该光纤的 DMGD 为-20~0 ps/km,比设计目标稍大。为演示 DMGD 补偿,将 18 km、10 km 和 22 km 的 3 种光纤熔接成 50 km 光纤段,与 D 光纤构建一个 100 km 的链路,测量总的 DMGD。从图 16 可以看出,在 1 530~1 565 nm 的 C 波段范围,DMGD 平均值的变化范围为-6~+5 ps/km。测得 LP₀₁ 和 LP₁₁ 在链路中的衰减大致相同,都是 0.25 dB/km。

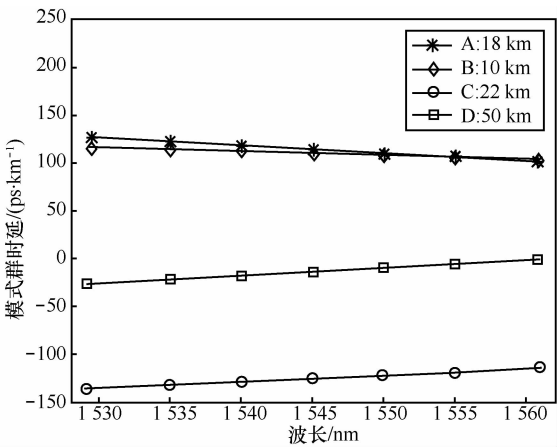


图 15 4 种实验光纤的 DMGD

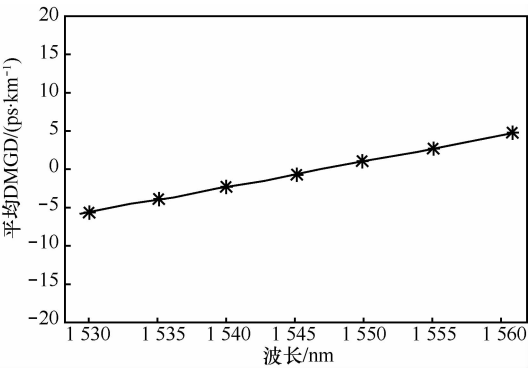


图 16 100 km 光纤链路的 DMGD 补偿

已经有多个系统实验演示了基于少模光纤的模式复用传输。表 4 总结了最新报道的几个实验,它们代表着该领域的最高水平。传输实验中采用的光纤模数是 3 或 6,要求进行 6×6 或 12×12 的多输入多输出处理。当然也可以实现更高的模数,但会大大增加多输入多输出的复杂度和处理时间。实验中采用了特殊的少模 EDFA,通过设计掺杂的剖面分布来均衡模式增益,今后可以进一步优化提高少模 EDFA 性能,以应用至更大的模数。对于复用/解多路复用的设备,实验采用的是具有相位板、3D 波导和自由空间光学器件的设备。其中,3D 波导方法更易于实现扩展模数的数量以及实现器件集成。



表 4 利用少模光纤的模分复用传输实验

光纤		系统									参考文献
模数 数量	差分模式 集群时延/ (ps·km ⁻¹)	跨距/km	模式复用/ 解复用	放大器	传输速率/ (Gbit·s ⁻¹)	信道数/ 个	信道间隔/ GHz	传输距离/ km	总承载量/ (Tbit·s ⁻¹)	光谱效率/ (bit·Hz ⁻¹)	
3	25	50	相位板	FM EDFA	76	146 16	25	500 1 000	66.57 7.30	18.2	[74]
6	183	59	3D 波导	SM EDFA	128	32	25	177	26.4	33.0	[75]
3	5.4	84, 35	相位板	FM EDFA	128	96	50	119	57.6	12	[76]
3	50	30	相位板	SM EDFA	80	1		1 200	0.19		[77]

4.2 多芯光纤

多芯光纤是另一种可用于空间复用的光纤。可设计成不同的多芯光纤结构,如图 17 所示为某些多芯光纤设计结构,图 17(a)为六边形设计,该设计具有最高的密度。但由于这种设计具有 6 个相邻的纤芯,故中央纤芯的串扰也是最严重的。为避免这个问题,可采用如图 17(b)所示的单环设计。图 17(c)是一种线性阵列设计。一个线性阵列可有 $n \times m$ 个纤芯,可将其设计成与半导体收发器匹配的阵列。图 17 的前 3 种设计中,光纤包层是圆形的。圆形光纤包层中的光纤芯数受包层直径的制约,因为如果包层直径过大,光纤会失去韧性。为克服这一限制可采用如图 17(b)的带状多芯光纤设计。带状结构的优点是在一个方向上可扩展光纤的芯数,在另一个方向上保持较小尺寸以保证光纤韧性。

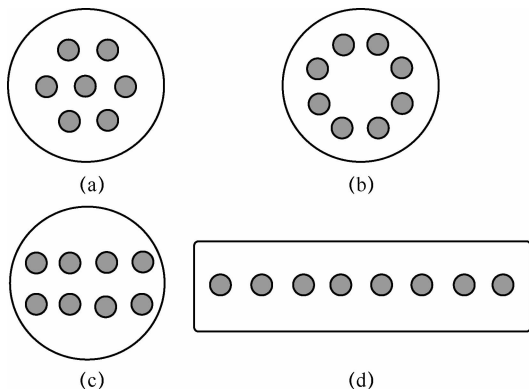


图 17 多芯光纤设计

多芯光纤设计最重要的一点是考虑芯间串扰。串扰与纤芯折射率结构和相邻纤芯之间的距离有关。串扰可利用耦合模式理论进行分析^[78]。考虑芯间距离为 D 的两个完全相同的纤芯,根据耦合模式理论,如果向纤芯 1 发送光信号,则在两个纤芯中传输的能量 P_1 和 P_2 将按正弦变化。能量串扰可利用式(9)计算:

$$X = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \log \left(\frac{4\kappa^2}{4g^2 \tan^2(gz) + (\Delta\beta)^2} \right) \quad (9)$$

其中, z 是传播距离, κ 是耦合系数, $\Delta\beta$ 是两纤芯分别传输时传输常数的失配, g 是依赖于 κ 和 $\Delta\beta$ 的参数,表示如下:

$$g^2 = \kappa^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 \quad (10)$$

串扰强度依赖于耦合系数 κ 和 $\Delta\beta$, 其中耦合系数和纤芯的结构及两纤芯间的距离相关, $\Delta\beta$ 和两纤芯间的折射剖面的差异有关。尽管更加复杂的模型可以更精确地确定多芯光纤的芯间串扰,可是这种简单的两纤芯模型更容易理解,对设计多芯光纤具有指导意义。根据式(8),降低串扰最重要的是减小耦合系数。耦合系数取决于相邻两纤芯基模电场的重叠部分。增大两纤芯间的距离可减小耦合系数,但会降低传输密度。在纤芯周围设计低折射率沟槽可以把电场限制在纤芯周围区域,从而抑制串扰。串扰的另一个因素是两纤芯间传输常数失配。很小的失配就可有效减少从一个纤芯传至另一个纤芯的最大功率。因此,异种纤芯设计相比同种纤芯设计,具有较低的串扰。

式(9)表示功率转换效率随耦合长度 $L=2\pi/g$ 呈正弦振荡,如果光纤长度远小于耦合长度的一半,式(9)便可用于计算串扰。但光纤长度一般比耦合长度大得多,有报道称测得的同种多芯光纤串扰不按式(9)所示的方式振荡,而是沿光纤长度方向线性增加^[79]。另外,也有报道说,测试的异种多芯光纤的串扰比功率转换效率大 40 dB^[80]。这种差异可能是由芯间差异及光纤弯曲效应引起的。考虑到光纤的弯曲和串扰的统计特性,可用式(11)表示平均串扰^[81]:

$$X = 2 \frac{\kappa^2}{\beta} \frac{R}{D} L \quad (11)$$

其中, κ 是耦合系数, β 是传输常数, R 是弯曲半径,下

一行是芯间距离, L 为光纤长度。式(11)表示平均串扰与光纤长度成正比, 这可以解释实验中串扰的线性关系。

为设计出低串扰的多芯光纤, 降低相邻两芯间两种模式传输的电场重叠是很重要的。研究人员详细研究了多芯光纤的阶跃折射率和沟槽结构实现纤芯密度最大化^[82]。图 18 给出了串扰与芯间间距的关系 (阶跃折射率和带沟槽两种结构)。该串扰利用式(11)通过参考文献[82]中得出的耦合系数近似算出。式(11)中的弯曲半径是 50 mm, 光纤长度是 100 km。计算结果表明, 对于有效面积为 $80\ \mu\text{m}^2$ 的阶跃折射率的剖面设计, 芯距应大于 $45\ \mu\text{m}$ 以保证经过 100 km 的传输后串扰低于 $-30\ \text{dB}$; 对带沟槽的剖面结构, 相同有效面积的芯距可降低至 $37\ \mu\text{m}$; 有效面积为 $100\ \mu\text{m}^2$ 的带沟槽结构光纤, 其芯距比有效面积 $80\ \mu\text{m}^2$ 阶跃折射率的光纤还小。

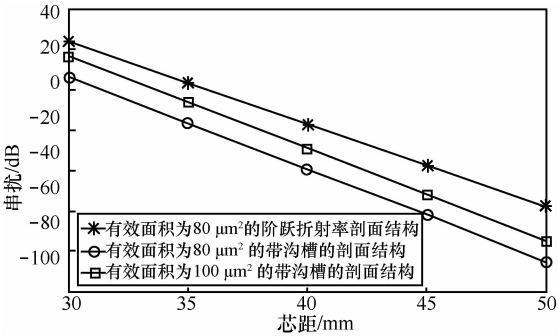


图 18 阶跃折射率和沟槽辅助结构光纤的芯距和串扰关系

多芯光纤的包层直径还可增大以容纳更多的纤芯, 但光纤直径受限于机械可靠性要求。最大光纤直径应小于 $230\ \mu\text{m}$, 以确保弯曲半径小于 50 mm 时失效率低于一定比例^[83]。这种直径的多芯光纤在满足传输 100 km 串扰容许条件下可容纳的最大芯数约为 19。

利用空分复用的低损耗、低串扰多芯光纤已在传输实验中获得验证。表 5 总结了采用多芯光纤的空分复用传输的最新实验, 代表多芯光纤传输目前的最高水平。参考文献[84,85]演示的传输系统的光谱效率约为 $100\ \text{bit}/\text{Hz}$, 总

传输容量超过 $1\ \text{Pbit}/\text{s}$; 参考文献[86]利用多芯掺铒光纤放大器实现了超过 6 000 km 的长距离传输; 参考文献[87]实现了含有 19 个纤芯的多芯光纤制作并用于传输实验。

多芯光纤对高密并行短距离数据连接也有很大吸引力。参考文献[88]中推荐利用 VCSEL 阵列和多芯光纤实现多信道传输, 演示了通过线性 VCSEL 阵列直接耦合 2×2 多芯光纤以 $1\ \text{Gbit}/\text{s}$ 速率传输。参考文献[89]报道了六边形 7 芯多模多芯光纤采用锥形多芯接头和 VCSEL 进行传输。另外, 参考文献[90,91]还提议将硅光子线性阵列收发器用于多芯光纤, 并制造出具有多芯光纤的 1×4 和 2×4 线性阵列纤芯。研究表明, 纤芯间隔为 $47\ \mu\text{m}$ 的阶跃折射率结构的多芯光纤, 传输 200 m 后两个相邻纤芯间的串扰低于 $-45\ \text{dB}$, 非常适用于短距离传输。参考文献[92]报道了带状矩形低串扰的多芯光纤。

4.3 实际应用中空分复用系统所面临的挑战

尽管少模和多芯光纤及空分复用传输系统技术已经取得重大的进步, 但空分复用在用于实际网络之前, 光纤和器件仍然面临巨大的挑战。就光纤来讲, 制造商必须理解多芯和少模光纤系统的光纤设计理念, 并确定关于串扰、模数耦合、多路干扰和衰减的最优设计方案。最重要的是必须开发低成本的工艺进行多芯和少模光纤的批量生产。

从器件发展的角度, 需要制造商支持开发空分复用系统光器件, 包括收发器阵列、低成本的复用和解复用元件、能同时放大多模和多芯信号的光放大器、精密耦合元件和连接器。器件开发面临的挑战甚至大于开发多芯光纤和少模光纤本身。对于空分复用器件的开发, 把各种器件、收发器、波分复用器件集成构建子系统至关重要, 没有子系统的集成很难实现空分复用的成本效益。

要克服上述挑战需要很长时间, 距离空分复用技术用于实际的通信系统还有很长的路要走。也许可先考虑多芯光纤技术用于短距离传输, 因为短距离传输链路并不需要诸如多芯放大器、多路复用器/解复用器之类长距

表 5 利用多芯光纤进行空分复用的传输实验

光纤				系统							参考文献
纤芯数量	纤芯间距/ μm	光纤直径/ μm	有效面积/ μm^2	跨距/km	数据传输速率/($\text{Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$)	信道数目/个	信道间距/GHz	传输距离/km	总容量/($\text{Tbit}\cdot\text{s}^{-1}$)	光谱效率/($\text{bit}\cdot\text{Hz}^{-1}$)	
12	37	225	81	52	456	222	50	52	1 010	91.4	[84]
12 SM	45	216	80	3	92,103	385	25	3	1 050	109	[85]
2 FM					213						
7	56	200	99	55	128	40	50	6 160	28.8	14.4	[86]
19	35	200	72	10.1	86	100	100	10.1	305	30.5	[87]



离传输中的必需器件,另外多芯光纤可采用低成本的硅光子收发器线性阵列,它所提供的高带宽—距离性能,能满足数据中心和高性能计算机互连的功率和密度要求。

参考文献

- Kapron F P, Keck D B, Maurer R D. Radiation losses in glass optical waveguides. *Trunk Telecom Guided Waves*, 1970(1):148~153
- Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibers. *Nature Photonics*, 2013 (7):354~362
- Sanferrare R J. Terrestrial lightwave systems. *AT&T Tech Journal*, 1987, 66(1): 95~107
- Joyce W B, Dixon R W, Hartman R L. Statistical characterization of the lifetimes of continuously operate (Al,Ga)as double-heterostructure lasers. *Applications Physical Letters*, 1976, 28(11): 684~686
- Joyce W B, Dixon R W, Hartman R L. Continuously operated (Al,Ga)as double-heterostructure lasers with 70oC lifetimes as long as two years. *Applications Physical Letters*, 1977, 31(11): 756~759
- Horiguchi M, Osanai H. Spectral losses of low-OH-content optical fibres. *Electronic Letters*, 1976(12): 310~312
- Miya T, Terunuma Y, Hosaka T, *et al.* Ultimate low-loss single-mode fibers at 1.55 μm . *Electronic Letters*, 1979 (15): 106~108
- Tynes A R, Derosier R M. Low-loss splices for single mode fibers. *Electronic Letters*, 1977, 13(22): 673~674
- Tsuchiya J, Hayakayama I. Proceedings of the Topical Meeting on Optical Fiber Transmission II, PD1-1, Williamsburg, VA, 1977
- Ainslie B J, Beales K J, Day C R, *et al.* The design and fabrication of monomode optical fiber. *IEEE Journal on Quantum Electronic*, 1982(QE-18):514~521
- Lazay P D, Pearson A D. Developments in single mode fiber design, materials, and performance at Bell Laboratory. *IEEE Journal on Quantum Electronic*, 1982(QE-18):504~510
- Keiser G. *Optical Fiber Communications*. New York: Academic, 1985
- Miller C A, Reeve M H, Hornung S, *et al.* Optimum design of 1.3 μm and 1.55 μm monomode fiber. *Proceedings of Sixth Top Meetings on Optical Fiber Communication, OFC'83, New Orleans, LA-I, 1983*
- Bhagavatula V H, Keck D B, Westwig R A, *et al.* Step index single mode waveguide design study. *Proceedings of Sixth Top Meetings on Optical Fiber Communication, OFC'82, Phoenix, AZ, 1982*
- Cohen L G, Lin C, French W G. Tailoring zero chromatic dispersion into the 1.5~1.6 μm low-loss spectral region of single-mode fibers. *Electronic Letters*, 1979(15):334~335
- Gambling W A, Matsumura H, Ragdale C M. Zero total dispersion in graded-index single mode fibers. *Electronic Letters*, 1979(15): 474~476
- Francois P L. Zero dispersion in attenuation optimized doubly clad fibers. *Journal on Lightwave Technology*, 1983(1):26~37
- Bhagavatula V A, Blaszyk P E. Single-mode fiber with segmented core. *Proceedings of Sixth Top Meetings on Optical Fiber Communication, OFC'83, New Orleans, LA-I, 1983*
- Bhagavatula V A, Spatz M S, Quinn D E. Uniform waveguide dispersion segmented-core designs for dispersion-shifted single-mode fibers. *Proceedings of Seventh Top Meetings on Optical Fiber Communication, OFC'84, New Orleans, LA, 1984*
- Cooper D M, Craig S P, Day C R, *et al.* Multiple index structures for dispersion-shifted single-mode fibers. *Proceedings of Eighth Top Meetings on Optical Fiber Communication, OFC'85, San Diego, CA, 1985*
- Cooper D M, Craig S P, Ainslie B J, *et al.* Dispersion shifted single-mode fibers using multiple index structures. *Britain Telecom Technology Journal*, 1985(3):52~58
- Desurvire E, Simpson J R, Becker P C. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. *Optical Letters*, 1987, 12 (1): 888~890
- Mears R J, Reekie L, Jauncey I M, *et al.* Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm . *Electronic Letters*, 1987, 23(19): 1026~1028
- Taga H, Yamamoto S, Mochizuki M, *et al.* 2.4 Gbit/s 1.55 μm WDM bidirectional optical fiber transmission experiment. *Transactions on IEICE*, 1988, E71(10):940~942
- Tkach R W, Chraplyvy A R, Forghieri F, *et al.* Four-photon mixing and high-speed WDM systems. *Journal on Lightwave Technology*, 1995, 13(5):841~849
- Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego, CA: Academic Press, 1989
- Newhouse M A, Button L J, Chowdhury D Q, *et al.* Optical amplifiers and fibers for multi-wavelength systems. *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Proceedings*, 1995(2):44~45
- Nouchi P, Sansonetti P, Landais S, *et al.* Low-loss single-mode fiber with high nonlinear effective area. *Proceedings of OFC'95, San Diego, USA, 1995: 260~261*
- Da Silva V L, Liu Y, Chowdhury D Q, *et al.* Error free WDM transmission of 8 $\times$ 10 Gbit/s over km of LEAFTM optical fiber. *Proceedings of 23rd European Conference on Optical Communications, Edinburgh, 1997: 154 ~158*
- Peckham D W, Judy A F, Kummer R B. Reduced dispersion slope, non-zero dispersion fiber. *Proceedings of ECOC'98, Madrid, Spain, 1998:139~140*

- 31 Liu Y. Dispersion shifted large-effective-area fiber for amplified high-capacity long-distance systems. Proceedings of OFC'97, Dallas, Texas, Feb 1997
- 32 Nouchi P. Maximum effective area for non-zero dispersion-shifted fiber. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, OFC'98, Technical Digest, San Jose, CA, USA, 1998:303~304
- 33 Nouchi P, Sansonetti P, Von Wirth J, *et al.* New dispersion shifted fiber with effective area larger than 90 μm^2 . Proceedings of ECOC'96. New York, USA, 1996:49~52
- 34 Liu Y, Berkey G. Single-mode dispersion-shifted fibers with effective area over 100 μm^2 . Proceedings of ECOC'98, Madrid, Spain, 1998: 41~42
- 35 Kahn J, Ho K P. Spectral efficiency limits and modulation/detection techniques for DWDM systems. IEEE Journals on Select Topics on Quantum Electronic, 2004(10):259~272
- 36 Tsukamoto S, Katoh K, Kikuchi K. Coherent demodulation of optical multilevel phase-shift-keying signals using homodyne detection and digital signal processing. IEEE Photon Technology Letters, 2006(18): 1113~1133
- 37 Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks. Proceedings of IEEE, 2012 (100): 1035~1055
- 38 Li M J, Nolan D A. Optical transmission fiber design evolution. Journal on Lightwave Technology, 2008(26):1079~1092
- 39 Abbott J, Bickham S, Dainese P, *et al.* Optical Fiber Telecommunications VIA. New York: Academic Press, 2013
- 40 Li M J. MMF for high data rate and short length applications. Proceedings of OFC2014, San Francisco, California, USA, 2014
- 41 Tateda M, Ohashi M, Tajima K, *et al.* Design of viscosity-matched optical fibers. IEEE Photon Technology Letters, 1992, 4(9):1023~1025
- 42 Maksimov L, Anan'ev A, Bogdanov V, *et al.* Inhomogeneous structure of inorganic glasses studied by Rayleigh, Mandel'shtam-Brillouin, Raman scattering spectroscopy, and acoustic methods. Materials Science and Engineering, 2011(25)
- 43 Kakiuchida H, Sekiya E H, Saito K, *et al.* Effect of chlorine on rayleigh scattering reduction in silica glass. Jpn J Appl Phys, 2003(42):1526~1528
- 44 Lines M E. Can the minimum attenuation of fused silica be significantly reduced by small compositional variations. Journal of Non-Crystalline Solids, 1994(171):209~218
- 45 Bickham S R. Ultimate limits of effective area and attenuation for high data rate fibers. Proceedings of OFC/NFOEC2010, San Diego, California, USA, 2010
- 46 Bigot-Astruc M. Trench-assisted profiles for large-effective-area single-mode fibers. Proceedings of ECOC2008, Brussels, Belgium, 2008
- 47 Tosco F. CSELT Fiber Optic Communications Handbook. McGraw-Hill TAB Books, 1990
- 48 Olshansky R. Distortion losses in cabled optical fibers. Application Optical, 1975,14(1):20~21
- 49 Downie J D. 12 Gbit/s PM-QPSK transmission systems with reach lengths enabled by optical fibers with ultra-low loss and very large effective area. Proceedings of SPIE, San Diego, California, USA, 2012
- 50 Downie J D, Hurley J, Cartledge J, *et al.* 40 $\times$ 112 Gbit/s Transmission over an unrepeated 365 km effective area-managed Span comprised of ultra-low loss optical fiber. Proceedings of ECOC2010, Turin, Italy, 2010
- 51 Downie J D, Hurley J E, Cartledge J, *et al.* Transmission of 112 Gbit/s PM-QPSK signals over 7 200 km of optical fiber with very large effective area and ultra-low loss in 100 km Spans with EDFAs only. Proceedings of OFC2011, Los Angeles, California, USA, 2011
- 52 Downie J D, Hurley J, Cartledge J C, *et al.* 112 Gbit/s PM-QPSK transmission up to 6 000 km with 200 km amplifier spacing and a hybrid fiber Span configuration. Proceedings of ECOC2011, Geneva, Switzerland, 2011
- 53 Salsi M, Koebele C, Tran P, *et al.* 80 $\times$ 100 Gbit/s transmission over 9 000 km using erbium-doped fiber repeaters only. Proceedings of ECOC2010, Turin, Italy, 2010
- 54 Qian D, Huang M, Zhang S, *et al.* Transmission of 115 $\times$ 100 Gbit/s PDM-8QAM-OFDM channels with 4 bit/s/Hz spectral efficiency over 10 181 km. Proceedings of 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, Geneva, Switzerland, Sep 2011
- 55 Zhang C L, Li J J, Huo X L, *et al.* 112 Gbit/s PDM-QPSK transmission over 3 000 km of G.652 ultra-low-loss fiber with 125 km EDFA amplified Spans and coherent detection. Proceedings of OECC2011, Kaohsiung, Taiwan, China, 2011
- 56 Oshansky R, Keck D B. Pulse broadening in graded-index optical fibers. Application Optical, 1976, 15(2): 491~493
- 57 Molin D. Chromatic dispersion compensated multimode fibers for data communications. Proceedings of ECOC2011, Geneva, Switzerland, 2011
- 58 Chen X, Li M J, Hurley J E, *et al.* Chromatic dispersion compensated 25 Gbit/s multimode VCSEL transmission around 850 nm with a MMF jumper. Proceedings of OFC/NFOEC2013, Los Angeles, California, USA, 2013
- 59 Ledentsov N N. Progress on single mode VCSELs for data and telecommunications. Proceedings of SPIE, San Diego, California, USA, 2012
- 60 Li M J, Tandon P, Bookbinder D C, *et al.* Designs of bend-insensitive multimode fibers. Proceedings of OFC/NFOEC2011, Los Angeles, California, USA, 2011



- 61 Sim D H, Takushima Y, Chung Y C. 100 Gbit/s transmission over 12.2 km of multimode fiber using mode-field matched center launching technique. Proceedings of OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, 2007
- 62 Chen X. 25 Gbit/s transmission over 820 m of MMF using a multimode launch from an integrated silicon photonics transceiver. Proceedings of ECOC2013, London, UK, 2013
- 63 Kise T. Development of 1 060 nm 25 Gbit/s VCSEL and demonstration of 300 m and 500 m system reach using MMFs and link optimized for 1 060 nm. Proceedings of OFC2014, San Francisco, California, United States, 2014
- 64 Dainese P. Novel optical fiber design for low-cost optical interconnects in consumer applications. Optics Express, 2012, 20(24): 26528~26541
- 65 Berdague S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers. Application Optical, 1982, 21(11): 1950~1955
- 66 Stuart H R. Dispersive multiplexing in multimode optical fiber. Science, 2000(289):281~283
- 67 Li M J, Ip E, Huang Y. Large effective area FMF with low DMGD. Invited Talk, IEEE Summer Topicals 2013, Waikoloa HI, Jul 2013
- 68 Li M J. Low delay and large effective area few-mode fibers for mode-division multiplexing. Proceedings of OECC2012, Seo-gu, Daejeon, Korea, 2012
- 69 Bai N. Mode-division multiplexed transmission with inline few mode fiber amplifier. Optical Express, 2012(20): 2668~2680
- 70 Gruner-Nielsen L. Few mode transmission fiber with low DGD, low mode coupling, and low loss. Journal of Lightwave Technology, 2012(30):3693~3698
- 71 Sillard P, Molin D, Bigot-Astruc M, *et al.* Low-DMGD 6-LP-mode fiber. Proceedings of OFC2014, San Francisco, California, United States, 2014
- 72 Mori T, Sakamoto T, Wada M, *et al.* Six-LP-mode transmission fiber with DMD of less than 70 ps/km over C+L band. Proceedings of OFC2014, San Francisco, California, United States, 2014
- 73 Sakamoto T. Differential mode delay managed transmission line for wide-band WDM-MIMO system. Proceedings of OFC/NFOEC2012, Los Angeles, California, USA, 2012
- 74 Ip E. 146λ ×6 ×19-Gbaud wavelength- and mode-division multiplexed transmission over 10×50 km spans of few-mode fiber with a gain-equalized few-mode EDFA. Proceedings of OFC2013, Anaheim, CA, USA, 2013
- 75 Ryf R. 32 bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177 km few-mode fiber. Proceedings of OFC2013, Anaheim, CA, USA, 2013
- 76 Sleiffer V, Jung Y, Veljanovski V, *et al.* 73.7 Tbit/s (96×3×256 Gbit/s) mode-division-multiplexed DP-16QAM transmission with inline MM-EDFA. Proceedings of ECOC2012, Amsterdam, The Netherlands, 2012
- 77 Randel S, Ryf R, Gnauck A, *et al.* Mode-multiplexed 6×20-GBd QPSK transmission over 1 200 km DGD-compensated few-mode fiber. Proceedings of OFC2012, Los Angeles, California, USA, 2012
- 78 Marcuse D. Theory of Dielectric Optical Waveguide, 2nd Edition. Academic Press, 1991
- 79 Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, *et al.* An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction. IEICE Transactions on Communications, 2011(E94-B): 409~416
- 80 Imamura K, Mukasa K, Yagi T. Investigation on multi-core fibers with large Aeff and low micro bending loss. Proceedings of OFC2010, Los Angeles, California, USA, 2010
- 81 Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, *et al.* Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. Optical Express, 2011, 19(17):16576~16592
- 82 Saitoh K, Koshiha M, Takenaga K, *et al.* Crosstalk and core density in uncoupled multicore fibers. Photon Technology Letters, 2012, 24(2):1898~1901
- 83 Imamura K, Mukasa K, Yagi T. Effective space division multiplexing by multi-core fibers. Proceedings of ECOC2010, Turin, Italy, 2010
- 84 Takara H. 1.01 Pbit/s (12 SDM/222 WDM/456 Gbit/s) crosstalk-managed transmission with 91.4 bit/s/Hz aggregate spectral efficiency. Proceedings of ECOC2012, Amsterdam, The Netherlands, 2012
- 85 Qian D. 1.05 Pbit/s transmission with 109 bit/s/Hz spectral efficiency using hybrid single and few-mode cores. Frontiers in Optics 2012, 2012
- 86 Takahashi H. First demonstration of MC-EDFA repeated SDM transmission of 40×128 Gbit/s PDM-QPSK signals per core over 6 160 km 7-core MCF. Proceedings of ECOC2012, Amsterdam, The Netherlands, 2012
- 87 Sakaguchi J. 305 Tbit/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4):554~562
- 88 Rosinski B, Chi J D, Grosso P, *et al.* Multichannel transmission of a multi-core fiber coupled with VCSEL. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5):807~810
- 89 Zhu B, Taunay T F, Yan M F, *et al.* 70 Gbit/s multicore multimode fiber transmissions for optical data links. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(22):1647~1649
- 90 Li M J, Hoover B, Nazarov V N, *et al.* Multi-core fiber for optical interconnect applications. Proceedings of OECC2012, Seo-gu, Daejeon, Korea, 2012

91 Butler D L, Li M J, Li S P, *et al.* Multicore optical fiber and connectors for high bandwidth density, short reach optical links. Proceedings of IEEE Photonics Conference 2012, San Diego, California, USA, 2012

92 Egorova O N, Semjonov S L, Senatorov A K, *et al.* Multi-core fiber with rectangular cross-section. Optical Letters, 2014, 39(7): 2168~2170

[作者简介]



李明军,男,博士,1988年获法国 Nice 大学物理学博士学位,纽约康宁公司高级研究员,美国光学学会、IEEE 通信协会以及 IEEE 激光与光电协会的成员,主要从事光纤、光网络和系统领域以及新型光纤的研究工作,是许多通信光纤和特殊光纤的主要发明人和贡献者,研究成果包括超低损耗偏振模色散光纤的设计和制作以及采用纳米结构(nanoStructuresTM)技术研制光纤和 ClearCurve 光纤、色散位移 LEAF 光纤、高带宽多模光纤、空间复用多芯和少模光纤等。他的研究方向还包括各种特种光纤,如光子晶体光纤、光子禁带光纤、单偏振光纤以及大功率激光器光纤等。

1998 年,他因切伦科夫二次谐波产生的工作获得法

国在波导光学方面的国家奖励;2005 年,他在康宁公司的杰出工作获得 Stookey 奖。他是光通信领域知名刊物 Journal of Lightwave Technology 的副主编,国际光通信会议 APOC 分委主席,OFC/OECC/LEOS 冬季主题会议以及 APOS、ITCom 技术委员会成员。拥有 106 项美国发明专利,在学术刊物和会议上发表了 200 多篇学术论文,出版了 3 本学术专著。



陈皓,男,康宁光通信中国公司光纤市场开发经理,从事康宁新型光纤产品市场开发及应用工作,现主要负责低损耗及超低损耗光纤在中国地区的市场应用开发和产品线管理。组织和参与了多项新型光纤的应用研究和测试工作,包括中国电信股份有限公司 3 000 km 超长距离 100 Gbit/s 系统传输研究测试、中国移动通信有限公司研究院 400 Gbit/s 系统在新型光纤传输的研究测试、中国电信股份有限公司北京研究院 1 Tbit/s 高速传输系统在不同光纤上的传输性能研究测试等。在学术刊物和会议上发表了 10 多篇学术论文,多次应邀在国际和国内专业及行业会议上发表演讲。

(收稿日期:2014-06-01)

· 简讯 ·

2014 年 4 月通信业主要指标完成情况(一)

指标名称	单位	本年本月止累计到达	比上年同期累计	本月
电信营业收入	亿元	4 539.4	6.7%	1 171.5
其中:电信主营业务收入	亿元	3 926.8	6.3%	1 018.4
电信固定资产投资完成额	亿元	652.6	0.0%	142.0
固定本地电话通话时长合计	万分钟	8 664 682.3	-13.9%	2 266 952.2
区间电话通话时长	万分钟	861 431.2	-18.2%	229 494.4
区内电话及拨号上网通话时长	万分钟	7 803 251.1	-13.4%	2 037 457.8
固定长途电话通话时长合计	万分钟	1 742 124.4	-9.1%	469 433.9
国内长途电话通话时长	万分钟	1 708 200.8	-8.7%	460 432.4
国际电话通话时长	万分钟	19 888.7	-30.5%	5 335.2
港澳台电话通话时长	万分钟	14 034.9	-23.1%	3 666.3
移动电话通话时长合计(含本地)	万分钟	95 846 864.1	2.4%	25 006 326.6
移动电话国内长途通话时长	万分钟	22 103 144.8	4.0%	5 929 515.6
移动电话国际电话通话时长	万分钟	42 618.8	6.9%	11 098.3
移动电话港澳台电话通话时长	万分钟	30 749.7	-3.6%	7 862.2
移动短信业务量	万条	25 086 428.9	-18.8%	6 219 844.8
移动互联网接入流量	万吉比特	55 097.4	52.3%	14 445.3

注:(1)收入增长率按可比口径计算。(2)固定长途电话通话时长和移动电话通话时长均包含相应的 IP 电话通话时长。(3)通话时长各项指标均为去话通话时长。

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)