

文章编号: 0253-2239(2009)10-2692-06

非零色散位移光纤的改进设计及制造

吴金东^{1,2} 吴兴坤¹ 卢卫民² 吴海港² 张立永² 黄晓鹏²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
(² 浙江富通光纤技术有限公司, 浙江 富阳 311422)

摘要 介绍了一种新颖的非零色散位移光纤结构设计方法及其 MCVD+OVD 制造工艺, 所制备的光纤有效面积达到 $71 \mu\text{m}^2$ 以上。采用关键结构区域精确微扰方法, 改进了光纤的色散特性, 1550 nm 处色散斜率由 $0.0715 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 分别减小至 $0.0605 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, $0.0466 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 零色散波长由 1500 nm 附近移至 1450 nm 以下。测量表明, 所得光纤具有优越的光学传输特性、抗弯曲性能和熔接性能, 适用于 C+L 和 S+C+L 工作波长的大容量高速率长距离密集波分复用系统。光纤关键结构区域精确微扰是改进光纤性能的一种有效方法, 该方法不限于 MCVD 工艺和非零色散位移光纤, 对新型光纤的设计和生具有积极的指导意义。

关键词 光纤光学; 非零色散位移光纤; 结构区域微扰; 色散斜率; 大有效面积

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2692

Improved Fiber Design and Fabrication of Non-Zero Dispersion-Shifted Fibers

Wu Jindong^{1,2} Wu Xingkun¹ Lu Weimin² Wu Haigang²

Zhang Liyong² Huang Xiaopeng²

(¹ National key laboratory of modern optical instruments, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 3100272, China)
(² Zhejiang Futong Optical Fiber Technology Limited Company, Fuyang, Zhejiang 311422, China)

Abstract A novel design of non-zero dispersion-shifted fiber and its fabrication by MCVD + OVD process are presented. An effective-area of greater than $71 \mu\text{m}^2$ is obtained for the designed fiber. Dispersion characteristics is improved by reducing 1550 nm dispersion slope from $0.0715 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ to $0.0605 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ or $0.0466 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, while zero dispersion wavelength was shifted from 1500 nm to 1450 nm . Experimental measurement indicates that the fabricated fiber has an excellent optical transmission property with a excellent macro-bending and splice performance, suitable for high-speed long haul dense wavelength division multiplexing systems in C+L or S+C+L bands. This innovative design procedure utilizes accurate perturbation algorithm for fine adjustment of key-part of fiber configuration, the method is not limited to MCVD process and non-zero dispersion-shifted fibers, but also can be applied for the development of specialty fibers.

Key words fiber optics; non-zero dispersion-shifted fiber; perturbation of configuration; dispersion slope; large effective area

1 引 言

语音、数据、图像等信息业务的迅猛发展对光传输网络的传输容量和速率提出了越来越高的需求, 不断降低网络建设投资和运行维护成本, 还是网络运营商利益决策的关键因素。从技术和经济角度,

密集波分复用(DWDM)是广泛采用的解决宽带增长的技术方案, 通过提高单信道的传输速率以及增加传输信道与工作波长增大传输容量^[1]。在 DWDM 系统中, 色散容限与传输速率平方成反比减小, 光信噪比与传输速率成正比增加, 因此, 色散与

收稿日期: 2008-11-10; 收到修改稿日期: 2009-03-09

作者简介: 吴金东(1968—), 男, 博士研究生, 主要从事新型光纤的设计与制备等方面的研究。

E-mail: wjd3699@sina.com

导师简介: 吴兴坤(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信技术与器件等方面的研究。

E-mail: xingkunwu@163.com

偏振模色散、非线性效应已成为限制光纤远距离传输的主要因素^[2]。随着单信道传输速率向 40 Gb/s 甚至更高发展,以及信道数的成倍增加、信道间隔的减小,精确控制系统的积累色散、减小非线性效应是提高传输容量和距离的关键^[3,4]。

非零色散位移光纤是适用于 DWDM 传输技术而发展的光纤^[5],在长途 DWDM 传输系统中,由于色散斜率的作用,各通路的色散积累量是不同的^[6,7],为解决色散与偏振模色散、非线性效应相关的各种问题,在实际应用中需采用复杂的色散补偿、优化调制格式等技术^[8~10],增加了系统成本。降低色散斜率,优化工作波段色散的平坦性,减小光纤的相对色散斜率(RDS),对降低传输系统的色散补偿代价,增加传输容量和距离十分有利^[11]。此外,纤芯的有效面积是决定光纤非线性效应的关键因素,增大纤芯有效面积有利于减小光纤的非线性效应,但过大的有效面积对系统会有负面的影响。

近年来,非零色散位移光纤的设计研究非常活跃。光纤的色散斜率和有效面积存在一定矛盾,很难得到色散斜率和有效面积两者同时最优的光纤设计,一般都是在二者之间进行折中考虑^[12],如获得大的有效面积则牺牲色散斜率。国内外光纤生产企业已开发了具有不同特性的非零色散位移光纤(符合 ITU-TG. 655/656 规范)。从骨干网到城域网的 DWDM 传输网络中,这些非零色散位移光纤已经大量应用。然而,随着未来各种新型光传输网的发展与设计建设,开发新型非零色散位移光纤,获得大的有效面积、较低色散斜率和优化的色散,将工作波长从 C+L 波段拓展为 S+C+L 波段,是非常有价值的课题。

介绍一种非零色散位移光纤结构设计方法及其 MCVD+OVD 制作工艺,所制备的光纤同时具有大有效面积和低色散斜率的特点。通过光纤结构关键区域精确微扰,将光纤的工作波长从 C+L 波段拓展到 S 波段,对光纤的光学特性、色散斜率补偿效率和熔接特性进行了详尽的实验研究。

2 光纤设计与制备

有效面积、色散(包括偏振模色散)和色散斜率,以及零色散波长是 DWDM 系统中光纤的重要参数,本设计旨在保证光纤与目前大量应用的非零色散位移光纤具有相当的光学特性,并把低偏振模色散、良好抗弯曲和熔接性能纳入光纤的结构设计中,再结合 MCVD 工艺能精确控制折射率分布和材料

组成的技术优点,对影响光纤性能的关键结构进行精确微扰加以改进,以获得优化色散性能与工作波长的新型非零色散位移光纤。

获得大的纤芯有效面积的折射率剖面结构有多种设计^[13,14],其主要特征可概括为纤芯突出和芯部中心凹陷两种模型,结构如图 1 所示。多包层结构具有波导色散设计灵活的优点^[15,16],芯部中心凹陷结构容易增大有效面积^[17,18],但考虑与现实中大量采用的非零色散位移光纤兼容,同时兼顾预制棒制造中结构参数的工艺控制,提高产品的一致性和合格率,提出一种非零色散位移光纤折射率剖面模型,结构示意图如图 2。光纤结构为六个分层,即构成光纤芯部的 core1, core2 以及构成光纤包层的 clad1, clad2, clad3 和外包层 clad4。core1 折射率为阶跃分布,core2 折射率随半径变化(等同于线性或者抛物线),clad1, clad2, clad3 折射率为阶跃分布,clad4 为纯的二氧化硅玻璃包层。采用微分迭代解法^[19]模拟计算光纤的色散性能,结果表明,通过构成光纤芯部的 R_1, Δ_1 与 R_2, Δ_2 及其变化曲线,可以获得光纤设计目标的色散和有效面积等性能,通过 clad1 的 Δ_3 调整色散斜率,通过 clad2 的 Δ_4 和 R_4 调整光纤的弯曲性能,通过 clad3 的 Δ_5 可调整光纤的截止波

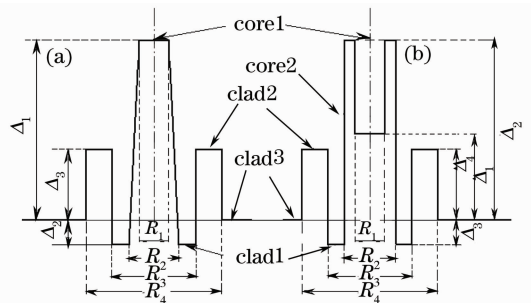


图 1 二类大有效面积光纤折射率剖面结构示意图

Fig. 1 Two schematic diagrams of refractive index profile for large effective area fibers

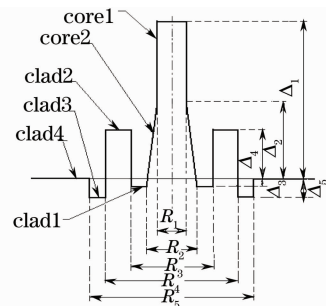


图 2 新制备光纤的折射率剖面结构

Fig. 2 Prototype refractive index profile of fabricated fibers

长。core2 这一结构设计的优点在于不但获得所设计的光学特性,而且有利于玻璃材料粘度匹配,优化光纤偏振模色散,改善衰减和熔接等性能。

以图 2 结构为原型,设计一种大有效面积光纤。先使用理论模拟计算出基本的结构参数,再经过实际光纤拉丝验证,取得一系列典型的结构参数,所得光纤的光学特性(编号样品 1[#])与目前广泛采用的大有效面积光纤一致(参照样品 0[#])。然后以所得的结构参数为基础,对结构 core1, core2 以及 clad1 进行精确微扰改进光纤的色散特性。光纤波导色散来自于光纤中基模场分布随波长的变化^[20]。改进光纤色散特性,需要从改变模场的分布着手,在反复的设计和测试过程中寻找对色散特性较为敏感的参量,并对其进行精细调整。如图 3 所示,对 core1 中心区域进行蚀刻形成适当的凹陷 core3,调整 core2 分布曲线,调整 clad1 的 Δ_3 及其与相邻区域的过渡等,改进光场能量在光纤芯包层中的分布,从而降低色散斜率,并将零色散波长调整到 1450 nm 以下,而工作波长也从 C+L 拓展到 S 波段。显然,实际所得效果的关键在于对微扰部分的精确控制。采用的一组典型结构参数见表 1,表中相对折射率 $\Delta_i = (n_i^2 - n_c^2)/2n_i^2$, n_c 是外包层的折射率。模拟计算 1550 nm 波长的色散值为 4.74 ps/(nm·km),相应色散斜率为 0.0735 ps/(nm²·km)。

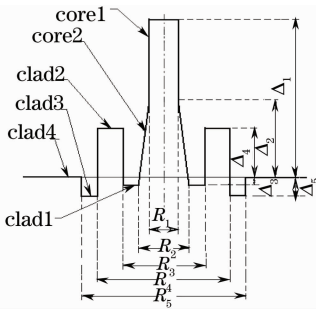


图 3 改进的光纤折射率剖面结构

Fig. 3 Improved refractive index profile of fabricated fibers

表 1 制备的光纤结构参数典型值

Table 1 Typical structure parameters of the fabricated fibers

Structure	Part	$\Delta_i/\%$	$R_i/\mu\text{m}$
core	core1	0.60	3.6
	core2	0.40	7.4
clad	clad1	-0.05	12.6
	clad2	0.23	18
	clad3	-0.08	20
	clad4	0	125

采用 MCVD 工艺制备光纤芯棒,沉积管为外径 36 mm,壁厚 2 mm,长度 1200 mm 进口合成石英管,通过设计每层的沉积厚度和材料组成实现折射率剖面的控制和玻璃粘度的匹配,列于表 1 的各结构层的材料组成和工艺配比见表 2。芯棒外径约 18.7 mm,表面约 0.4 mm 的富羟基层用氢氟酸蚀刻去除,然后采用 OVD 工艺制备外包层,沉积速率为 35 g/min,烧结脱水后所得预制棒外径约 80 mm。试验中光纤拉丝速度 1200 m/min,拉丝张力 195~210 g。基于 MCVD 工艺的特点,可以获得物理尺度和折射率分布(refractive index profile)结构的精确控制,如 core2 的折射率变化,通过按照其变化控制 GeCl₄ 的载料 O₂ 流量,降低反应物流量减小沉积厚度来实现,对于 core3 的 R₃ 和 Δ_5 ,则可通过 SF₆ 或者 C₂F₆ 流量和反应温度来控制,而光纤其它结构分层可通过适当提高反应物流量增加沉积厚度,减少总的沉积层数提高生产效率。

表 2 制备的光纤沉积条件典型值

Table 2 Typical deposition conditions for the fabricated fibers

Part	Composition	Gas flow ratio	Passes
core1	Si, Ge	1:2.8	2
core2	Si, Ge	1:0.3~1.8	16
clad1	Si, Ge, F	1:0.3:0.02	4
clad2	Si, Ge	1:0.5	5
clad3	Si, Ge, F	1:0.1:0.02	3

3 结果与讨论

按照表 1 结构参数所制备光纤的光学传输性能见表 3,其中 2[#], 3[#] 样品为结构精确微扰所获得的光纤,0[#] 光纤为作参照的大有效面积光纤(商品)。1[#] 光纤的光学特性与 0[#] 光纤相当一致,其纤芯有效面积为 72.3 μm^2 ,在 1550 nm 波长处的色散斜率为 0.0715 ps/(nm²·km),稍优于 0[#] 光纤的 0.0769 ps/(nm²·km),1[#] 光纤结构上的一项改进为,通过降低 Δ_3 (clad1), Δ_1 (core1)减小为 0.60%,优点是减少纤芯 Ge 的掺杂浓度,而 0[#] 光纤的 Δ_1 实测值为 0.67%。2[#], 3[#] 光纤的纤芯有效面积为 72 μm^2 和 71 μm^2 ,1550 nm 波长处的色散斜率分别降到 0.0605 ps/(nm²·km), 0.0466 ps/(nm²·km),在以往同类型大有效面积光纤中,这样的色散斜率未见报道过。图 4 为光纤色散系数对波长的曲线图,1[#] 光纤零色散波长小于 1500 nm,说明 1[#] 光纤支持 C+L 波段的密集波分复用传输系统。2[#], 3[#] 光纤零色散波长都小于 1450 nm。1460 nm 的色散

分别为 1.500 ps/(nm·km), 0.996 ps/(nm·km), 表明光纤不但在 C + L 波长满足密集波分复用传输系统, 而且 S 波段也支持 DWDM 系统。从图 4 可以看出, 3# 光纤的色散在长波长段更加平坦, 属于部分色散平坦光纤。三种光纤都具有 70 μm² 以上的纤芯有效面积, 说明光纤能够有效地减少非线性效应, 且色散斜率都有所降低, 改善了色散平坦

性。2#, 3# 光纤的零色散波长移到 1450 nm 以下, 1550 nm 的色散则适当增大到大约 7 ps/(nm·km), 能更有利于抑制四波混频(FWM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应, 因此光纤可以承载更多的信道。显然, 三种光纤都适合大容量高速率的密集波分复用传输干线网和城域网。

表 3 制备的光纤与常规大有效面积光纤传输特性典型值

Table 3 Typical transmission characteristics of the fabricated fibers & conventional large effective area fiber

Item	Wavelength /nm	Fabricated fibers			Conventional leaf fiber 0#
		1#	2#	3#	
Dispersion /[ps / (nm · km)]	1460	-1.960	1.500	0.996	-
	1530	2.995	5.748	6.010	2.720
	1550	4.425	6.969	7.089	4.222
	1565	5.506	7.884	8.006	5.399
	1625	9.847	11.624	9.618	9.958
Ds / [ps / (nm ² · km ¹)]	1550	0.0715	0.0605	0.0466	0.0769
λ ₀ / nm	-	1487	1435	1445	1495
MFD / μm	1550	9.7	9.6	9.5	9.6
A _{eff} / μm ²	1550	72.3	72	71	72
A _{eff} × D ₁₅₅₀	1550	319.9	501.8	503.3	304.0
RDS / nm ⁻¹	1550	0.0162	0.0087	0.0066	0.0182
PMD / (ps / km ^{1/2})	1550	0.04	0.03	0.04	0.04
λ _{cc} / nm	-	≤1450	≤1330	≤1360	≤1480
Attenuation / (dB / km)	1550	0.21	0.20	0.22	0.21
Macro bending loss	1550	<0.04	<0.03	<0.04	<0.05
with C 60 100turns / dB	1625	<0.04	<0.03	<0.04	<0.05

表 4 制备的光纤用 DCF 模块的 D₁₅₅₀, S₁₅₅₀, RDS 和 DSCR 值

Table 4 D₁₅₅₀, S₁₅₅₀, RDS and DSCR of fabricated fiber with DCF modules

Fiber	D ₁₅₅₀ /[ps / (nm · km)]	D _{s1550} /[ps · / (nm ² · km)]	RDS / nm ⁻¹	DSCR / %	
A	-95	-0.33	0.00347	A	B
B	-98	-0.63	0.00643	-	-
0#	4.222	0.0769	0.01821	19.1	35.3
1#	4.425	0.0715	0.01616	21.5	39.8
2#	6.969	0.0605	0.00868	40.0	74.1
3#	7.089	0.0466	0.00657	52.8	97.8
G652	17	0.06	0.00353	98.4	-

Conventional DCF modules; A W-band DCF, B H-slope DCF

色散补偿光纤(DCF)对光纤色散斜率的补偿能力可以用相对色散斜率(RDS)来衡量, 即色散斜率补偿效率(DSCR), 商用 DCF 的 RDS 一般在 0.002~0.01 nm⁻¹ 之间, 提高光纤的 DSCR 就要求尽量降低光纤的 RDS, 可见, 降低光纤色散斜率和适当增加色散值, 有利于增大光纤的色散斜率补偿效率。表 4 是以较普遍采用的两种 DCF 商用模块

为例, 计算在 1550 nm 波长对所制备光纤的色散斜率补偿效率。可见, 1# 光纤的 DSCR 较 0# 光纤稍有提高, 2#, 3# 光纤的 DSCR 远远高于 1# 和 0# 参照光纤, 利用高斜率 DCF, 2# 光纤的补偿效率可以达到 74%, 3# 光纤的补偿效率达到 97.8%, 接近于常规的 G652 光纤。可见, 利用现有的商用补偿模块, 3# 光纤很容易获得 100% 的补偿效率。

光纤熔接特性测量采用腾仓 40 S 熔接机和

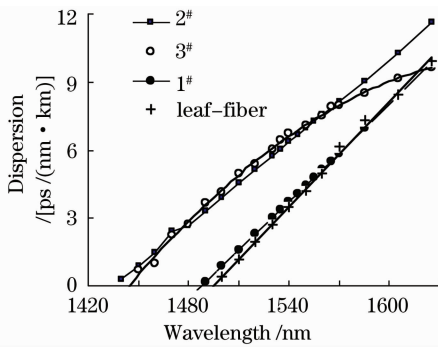


图4 制备的光纤与常规大有效面积光纤色散曲线

Fig. 4 Chromatic dispersion of the fabricated fibers and conventional large effective area fibers

OTDR(PK8000-183)测量设备,采用双向测量熔接点损耗的方法评价光纤的熔接性能。光纤熔接实验按照光纤与自身不同批次样品、与同类大有效面积光纤产品 01[#](国内 Y 公司)、02[#](国外 C 公司)和标准 G652 光纤四组进行,每组进行 100 次熔接,光纤熔接参数以 G. 652 为基础,熔接附加损耗分布见图 5,光纤自身的熔接附加损耗平均值小于 0.03 dB,与 01[#] 和 02[#] 的熔接附加损耗平均值小于 0.05 dB,与标准 G. 652 光纤的熔接附加损耗小于 0.09 dB,显示所得光纤具有非常好的熔接性能。从熔接实验结果分析,1[#], 2[#], 3[#] 光纤之间的熔接损耗低,表明结构的精确微扰对熔接性能没有特别的影响,对光纤色散性能产生明显的改进作用。

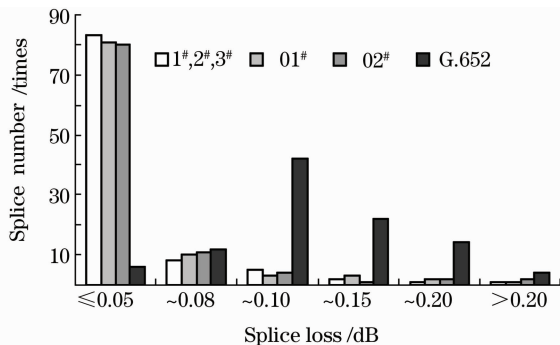


图5 1550 nm 波长处 OTDR 双向平均熔接损耗

Fig. 5 At 1550 nm average splice loss of tow directions test by OTDR

4 结 论

介绍了一种非零色散位移光纤的结构模型,利用 MCVD+OVD 工艺成功制得了纤芯有效面积达到 $71 \mu\text{m}^2$ 以上的光纤,光纤的光学性能与现有大有效面积的光纤相当一致,且光纤的色散斜率优化为 $0.0715 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,适用于 C+L 工作波长的密集波分复用传输系统。针对光纤关键结构区域的

精确微扰,改善了光纤的色散特性,1550 nm 色散斜率分别减小为 $0.0605, 0.0466 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,增加了色散平坦性,光纤的色散补偿斜率效率大幅提高,零色散波长由 1500 nm 附近移到 1450 nm 以下,支持 S+C+L 工作波长密集波分复用系统的应用。所得光纤具有好的光学传输性能、抗弯曲性能和熔接性能,适用于长距离大容量高速率波分复用通信传输网络。

研究结果显示,关键结构区域精确微扰是一种改进光纤性能的有效方法,其效果取决于微扰控制精度,显然,该方法不限于 MCVD 工艺和非零色散位移光纤本身,对新型光纤的设计和具有积极的指导意义。

参 考 文 献

- Zang Qi, Chen Minghua, Shi Ying *et al.*. Demonstration of 1.6 Tbit/s (40×40 Gbit/s) wavelength division multiplexing 160 km straight line transmission experiments [J]. *Chinese J. Laser*, 2006, **33**(9): 1230~1233
张琦,陈明华,石颖等. 1.6 Tbit/s (40×40 Gbit/s)光通信传输系统[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1230~1233
- Belahlou A, Bickham S, Chowdhury D *et al.*. Fiber design considerations for 40 Gbit/s systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**: 2290~2305
- Sun Xueming, Zhang Huijian, Zuo Meng. Impacts of polarization mode dispersion and nonlinear effect on 40 Gbit/s dense wavelength division multiplexing System[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1363~1369
孙学明,张慧剑,左萌. 偏振模色散及非线性效应对 40 Gbit/s 密集波分复用系统的影响[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1363~1369
- Ning Tigang, Jian Shuisheng, Fei Li *et al.*. 4×10 Gbit/s 412 km DWDM dispersion compensation using multiwavelength chirped fiber bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 839~841
宁提纲,简水生,裴丽. 4×10 Gbit/s 412 km 密集波分复用光纤光栅色散补偿的实验[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 839~841
- Li Mingjun, Danied A. Optical transmission fiber design evolution[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**: 1079~1092
- Zhao Wenyu, Zhao Jijun, Ji Yuefeng *et al.*. Research on the dispersion problem of high-speed fiber communication system and its compensation[J]. *Telecommun. Science*, 2002, **06**: 15~18
赵文玉,赵继军,纪越峰等. 高速光通信系统中的色散问题及其补偿研究[J]. 电信科学, 2002, **06**: 15~18
- Xie Xingchu, Chen Xue, Zhou Weiqin *et al.*. Comparison of the DCF dispersion compensation schemes in DWDM system with G. 655[J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2008, **2**: 25~28
谢幸初,陈雪,周伟勤等. G. 655 光纤 DWDM 系统的 DCF 色散补偿方案比较[J]. 光通信技术, 2008, **2**: 25~28
- Xu Wei, Duan Gaoyan, Fang Guangqing *et al.*. Analysis of polarization mode dispersion compensation performance for different modulation formats [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 226~232
许玮,段高燕,方光青等. 不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(2): 226~232
- Qin Xi, Chen Yong, Cao Jihong *et al.*. Influence of dispersion compensation schemes on phase noise of phase modulation systems [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(1): 62~66

- 秦 曦, 陈 勇, 曹继红 等. 色散补偿方式对相位调制系统中相位噪声的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 62~66
- 10 Chen Xin, Wu Keying, Ma Xiaohong *et al.*. Signal shaping based on phase pre-modulation in fiber transmission systems [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(1): 72~75
陈 新, 吴克瑛, 马晓红 等. 光纤传输系统中基于相位预调制的信号整形[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 72~75
- 11 Li Jinyan, Li Shiyu, Li Haiqing *et al.*. Design of new S-C-L band single mode fiber[J]. *Stusy on Opt. Commun.*, 2004, **122**(2): 45~47
李进延, 李诗愈, 李海清 等. S-C-L 三波段传输新型单模光纤的设计和研制[J]. 光通信研究, 2004, **122**(2): 45~47
- 12 Yoshihiro E, Naomi K, Kazumori M *et al.*. Trade-off of dispersion slope and effective area in ultra low slop NZ-DSF for non-dispersion-compensated WDM metro transmission [C]. *OFC/NFOEC*, 2005, 11
- 13 Gong Yandong, Jian Shuisheng. Research on large effective area fiber[J]. *Opt. Commun. Techn.*, 1999, **23**(2): 126~130
龚岩栋, 简水生. 大有效面积光纤的研究[J]. 光通信技术, 1999, **23**(2): 126~130
- 14 A. Safaai-Jazi, H. T. Hattori, J. A. Baghdadi. Large effective-area fibers[C]. *SPIE*, 1999. Vol. 3666: 30~39
- 15 Zhang Xiaoping, Tian Xiangqin. Analysis of waveguide dispersion characteristics of W I -and W II -type triple-cladding single-mode fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 581~586
张晓萍, 田祥庆. 三包层 W I 和 W II 型单模光纤波导色散特性的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(5): 581~586
- 16 Cheng Yu, Zhao Xiujian, Li Shiyu *et al.*. Optical fiber waveguide for dispersion control[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(5): 43~45
成 煜, 赵修建, 李诗愈 等. 控制色散的波导结构分析[J]. 光学与光电技术, 2006, **4**(5): 43~45
- 17 Kato M, Kurokawa K, Miyajima Y. A new design for dispersion shifted fiber with effective area larger than 100 μm^2 and good bending characteristics[C]. *OFC*, 1998, 22~27
- 18 Jiang Xiaoqiang, Wang Ruichun. Non-zero dispersion-shifted optical fibers with low nonlinearity for large capacity and long-haul transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 893~896
蒋小强, 王瑞春. 大容量长距离传输用低非线性效应非零色散位移光纤[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 893~896
- 19 Zhang Liyong, Wu Xingkun, Yang Rongjin. A differential iteration solution to chromatic dispersion of optical fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **11**: 2079~2082
张立永, 吴兴坤, 羊荣金. 光纤色散性能的微分迭代解法[J]. 光子学报, 2007, **11**: 2079~2082
- 20 Chen Genxiang. An Introduction to Lightwave Technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000. 70~71
陈根祥. 光波技术基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. 70~71