

· 学术论文与技术报告 ·

## 40 Gb/s 单通道光纤传输系统研究\*

李中桂\*\* 邱 昆

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

**【摘要】** 提出了一种比特率为40 Gb/s 的单通道传输系统的设计方案,通过大量的数值仿真研究了在单波长传输系统中放大器间隔、脉冲占空比、色散补偿因子、色散补偿系数、光纤的入纤功率等参数对系统传输性能的影响,并根据这些影响关系设计了一个九段的光纤传输系统,其传输距离为928 km。仿真结果对单波长和多波长40 Gb/s 光纤传输系统的设计具有指导意义。

**关键词** 误码率;  $Q$  值; 光纤传输系统; 色散补偿因子; 色散补偿系数; 脉冲占空比

**中图分类号** TN913.24

## Investigation of Single Channel Transmission System with Bit Rate 40 Gb/s

Li Zhonggui Qiu Kun

(College of communication and Information Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** On the basis of the transmission system model given in this paper, the impact of the parameters, such as input power, dispersion compensation coefficient, dispersion compensation factor, length of standard single mode fiber and pulse duty cycle on the system performance, which is evaluated by bit error rate and  $Q$  value of the system, is studied through extensive numerical simulation. Then a 9-span optical fiber transmission system with optimal parameters is designed. The simulation results are helpful to design systems based on bit rate of 40 Gb/s or above.

**Key words** bit error rate;  $Q$  value; optical fiber transmission system; dispersion compensation coefficient; dispersion compensation factor; pulse duty cycle

各种新业务的出现加剧了对通信网络带宽的需求,而基于高速光时分复用(OTDM, Optical Time Division Multiplexing)的波分复用系统(WDM, Wavelength Division Multiplexing)由于其高的频谱利用率,系统规模的缩减以及对网络管理的支持而倍受人们的重视<sup>[1]</sup>。单波长速率为10 Gb/s 的系统已经商用,目前正加紧研究单波长速率40 Gb/s 的系统性能,以降低每比特的价格。

40 Gb/s 系统比10 Gb/s 系统有诸多优势,如每比特的费用较低,系统易于维护,可靠性好,但这些优点的代价是采用更为复杂的技术来克服高速率带来的一系列问题,如色散容限更小,偏振模色散的影响更严重,对光信噪比的要求更高,非线性效应的影响也更加明显。针对这些问题,有关专家进行了大量的研究,提出了很多解决方案,如采用各种编码方式来减小非线性效应的影响<sup>[2]</sup>,设计了多种光放大技术,包括分布式喇曼光纤放大器和掺铒光纤放大器的混合光放大器技术来提高系统的光信噪比(OSNR)<sup>[3,4]</sup>,采取各种技术来补偿色散和色散斜率的影响等<sup>[1,5,6]</sup>。

2002年4月27日收稿

\* 教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划基金资助项目

\*\* 男 23岁 硕士生

本文提出了一种比特率为40 Gbp/s的单通道传输系统的设计方案,并通过大量的数值仿真研究了该光纤传输系统中入纤功率、单模光纤长度、色散补偿比例等参数对系统性能的影响。

## 1 仿真方法和仿真系统模型

仿真的系统结构如图1所示。

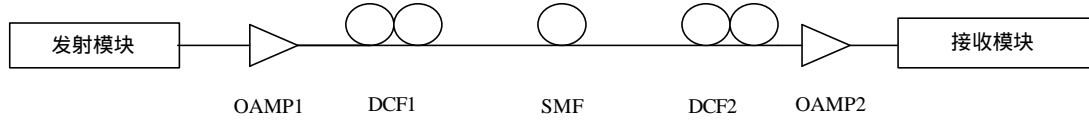


图1 仿真的系统模型

发射机以平均功率1 mW 输出40 Gb/s, 每比特32位采样的7阶 PRBS 归零码脉冲序列<sup>[6]</sup>。由图1可以看出, 系统包括了两段色散补偿光纤(DCF)和一段普通单模光纤(SMF), 其色散补偿光纤的长度为

$$L_{DCF1} \times D_{DCF} = R \times C_r \times L_{SMF} \times D_{SMF} \quad (1)$$

$$L_{DCF2} \times D_{DCF} = (1 - R) \times C_r \times L_{SMF} \times D_{SMF} \quad (2)$$

式中  $L_{DCF1}$  和  $L_{DCF2}$  分别表示色散补偿光纤 DCF1 和 DCF2 的长度;  $D_{DCF}$  为色散补偿光纤的色散;  $R$  描述了 DCF1 在色散补偿中所起的作用大小(本文称为色散补偿因子);  $C_r$  描述了色散补偿的比例(本文称为色散补偿系数), 当其为1时色散被完全补偿, 大于1时对应过补偿, 小于1时对应欠补偿;  $L_{SMF}$  和  $D_{SMF}$  分别表示普通单模光纤的长度和色散。其中 OAMP1 将输入脉冲放大, 并将其输出功率锁定在某一个值, OAMP2 用于补偿信号传输中的损耗, 其增益为

$$G = (L_{DCF1} + L_{DCF2}) \times a_{DCF} + L_{SMF} \times a_{SMF} \quad (3)$$

式中  $a_{DCF}$  和  $a_{SMF}$  为色散补偿光纤和普通单模光纤的损耗。信号在光纤中的传输方程用分步傅里叶方法求解<sup>[7]</sup>。在接收端, 用一个热噪声为  $10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  的光电二极管接收光信号, 然后通过一个三阶贝塞尔低通滤波器<sup>[6]</sup>。经过定时提取模块后, 用高斯近似法得到表征系统性能的误码率(BER)和  $Q$  值<sup>[5]</sup>, 用示波器模块可以观察接收到的信号眼图。

仿真系统中用的一些关键参数如表1所示。仿真中采用的其他参数为: SMF 长度为150 km, 色散补偿系数为1, 色散补偿因子为0.5, 归零码脉冲宽度为12.5 ps。

表1 仿真系统的关键参数

参数名	仿真使用值
比特率 $\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}$	40
中心频率/THz	193.1
$D_{DCF}/\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$	-96
$D_{SMF}/\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$	16
$a_{DCF}/\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	0.5
$a_{SMF}/\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	0.2
DCF 的有效面积/ $\mu\text{m}^2$	26
SMF 的有效面积/ $\mu\text{m}^2$	80
放大器噪声系数/dB	4
DCF 及 SMF 的非线性折射率/ $\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$	$2.6 \times 10^{-10}$
接收端电滤波器带宽/GHz	28

## 2 仿真结果及分析

在仿真过程中, 暂不考虑光纤的偏振模色散和色散斜率<sup>[5,6]</sup>。图2所示是系统的误码率随入纤光功率的变化曲线。由图2可知, 当输入光功率较小时, 由于达不到一定的光信噪比要求, 系统的误码率很高。随着入纤功率的不断提高, 误码率也不断下降。到入纤功率为11 dBm 时, 误码率降到最小, 系统有最优性能, 此时接收到信号的眼图如图3所示。当入纤功率继续增大时, 光纤中的非线性效应对系统性能的影响凸现出来, 本系统考虑的非线性效应是自相位调制(SPM, Self Phase Modulation), 忽略了受激散射效应及四波混频等其他非线性效应, 系统的性能不断恶化<sup>[8]</sup>, 当入纤功率达到13 dBm 时, 系统已不能无

误码传输( $-\lg BER > 9$ )。因此对码率越高的系统,需要越高的输入光功率以保证一定的光信噪比,同时由于存在非线性效应,输入光功率又必须限制在一定值之下。特别对密集波分复用系统,光纤中的总功率更大,由于自相位调制和交叉相位调制与群速度色散相互作用,系统性能严重恶化。

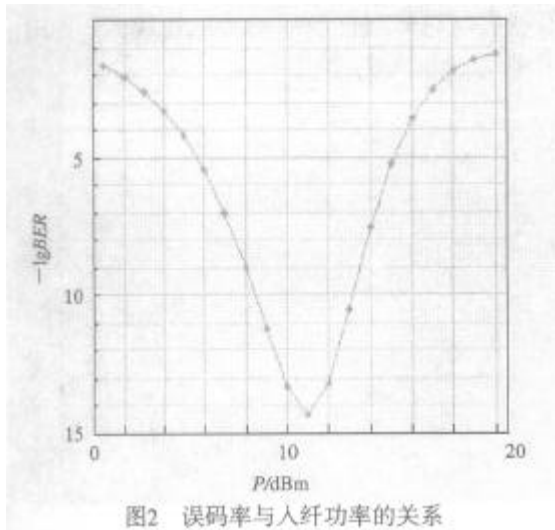


图2 误码率与入纤功率的关系

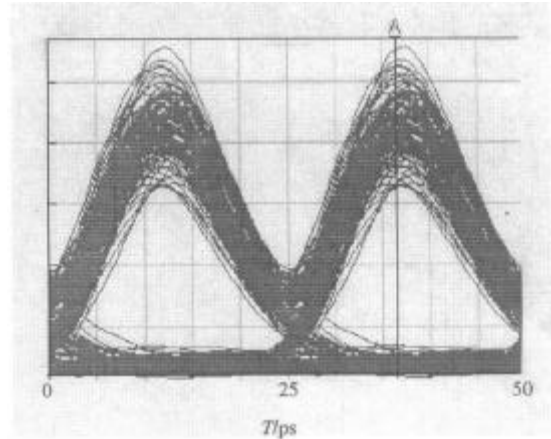


图3 输入光功率为11 dBm 时的眼图

图4给出了输入光功率为10 dBm 时系统的误码率随色散补偿因子  $R$  的变化关系,图5给出了系统的  $Q$  值随色散补偿因子  $R$  的变化关系。由图4可见,色散补偿因子对系统性能的影响不是很大, $R$  的取值应接近0或1,此时系统有较低的信噪比。由于色散补偿光纤的有效面积小,在相同的光功率下比普通单模光纤对光功率的变化更为敏感。而 DCF1 中的光功率没有经过衰减,其中的非线性效应较为显著,恶化了系统性能。从图中也可以看出,当  $R < 0.15$  和  $R > 0.70$  时系统性能较好,而前者更为有利,图6给出了不同色散补偿因子下系统误码率随入纤光功率的变化情况。由图可知,当  $R$  为0时,系统在入纤功率为13 dBm 时达到最小误码率,此时由于 DCF1 长度为0,系统的非线性效应影响减弱

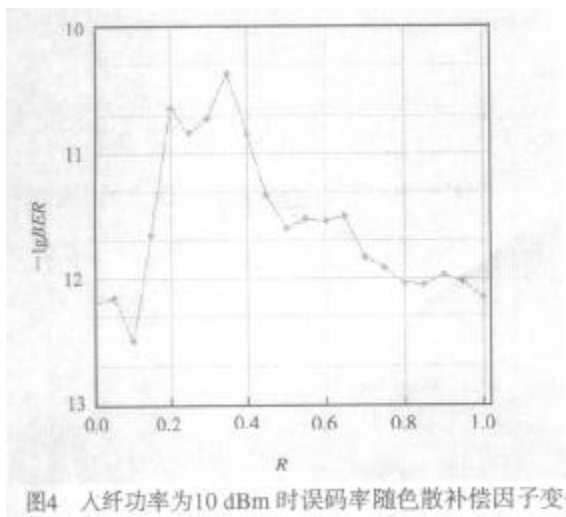


图4 入纤功率为10 dBm 时误码率随色散补偿因子变化

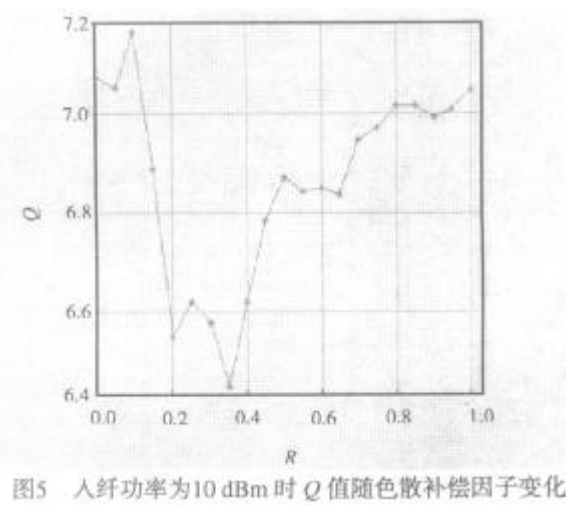


图5 入纤功率为10 dBm 时 Q 值随色散补偿因子变化

图7、图8分别给出了系统的误码率和  $Q$  值随色散补偿比例  $C_r$  的变化情况。由图可知,在单波长系统中,完全补偿时系统的性能最优。然而在波分复用系统中,由于色散斜率的存在,各波长的色散量不同,因此很难将每个波长的色散完全补偿,所以研究欠补偿和过补偿情况下的系统性能在波分复用系统中是一个重要的问题。图9 给出了在不同的色散补偿因子情况下,系统的误码率

随色散补偿系数的变化情况。

文献[9]用数值仿真的方法预测了在高速光纤传输系统中采用归零码比采用非归零码能获得更好的系统性能,并得到认可<sup>[10,11]</sup>。图10、11分别给出了系统的BER和Q值随归零码脉冲占空比的变化曲线。从图中可以看出,在脉冲占空比为0.15时系统有最佳的传输性能,随着脉冲宽度的增加,系统的性能不断下降。这是因为脉冲越窄,其色散容限越大,对非线性效应的容限也越大。但由于宽度越窄的脉冲具有越宽的频谱,在波分复用系统中必然需要更大的信道间隔。

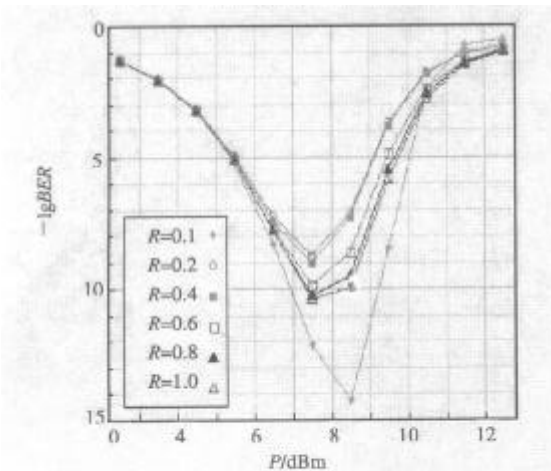


图6 不同色散补偿因子下误码率随入纤功率变化曲线

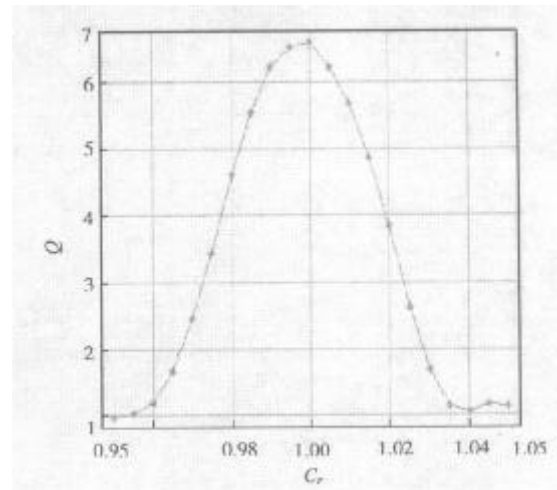


图7 Q值随色散补偿系数的变化曲线

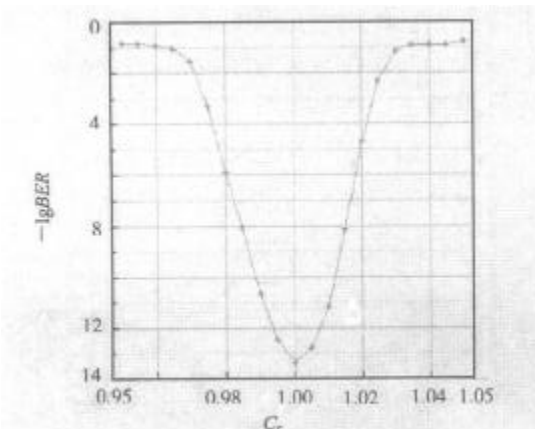


图8 误码率随色散补偿系数的变化曲线

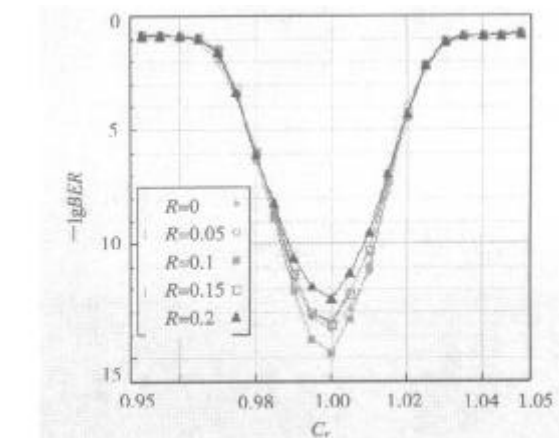


图9 不同补偿因子下BER随色散补偿系数的变化曲线

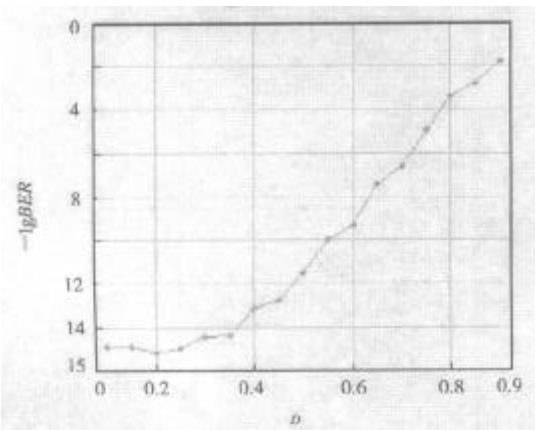


图10 误码率随归零码脉冲占空比的变化曲线

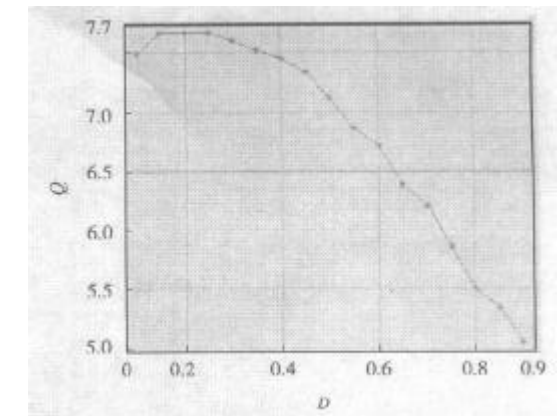


图11 Q值随归零码脉冲占空比的变化曲线

图12、13分别给出了不同单模光纤长度(对应不同放大器间隔)时系统的误码率和  $Q$  值的变化情况。由图可见, 在普通单模光纤长度小于120 km 时, 系统的误码率很低, 传输性能很好。但当普通单模光纤长度大于120 km 时, 系统传输性能快速下降。在设计多段光纤传输系统时普通单模光纤的长度宜选为80~120 km。

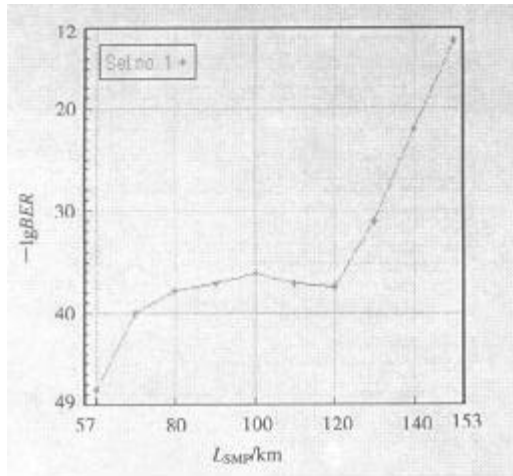


图12 误码率随单模光纤长度变化曲线

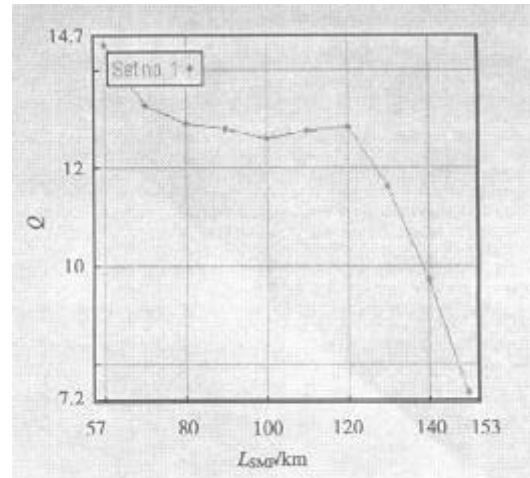


图13  $Q$  值随单模光纤长度变化曲线

根据仿真参数, 本文设计了一个传输距离为928 km 的长距离传输系统。系统由九段模块构成, 普通单模光纤长度为100 km, 入纤功率为10 dBm, 脉冲占空比为0.15, 色散补偿因子为0.15, 色散补偿系数为1。系统的误码率为  $7 \times 10^{-10}$ ,  $Q$  值为6.1。接收信号的眼图如图14所示。

### 3 结 论

色散和非线性效应是高速率光纤传输系统中最主要的因素。太小的色散将导致非线性效应的影响更大, 太大的色散则对光脉冲的展宽, 从而发生符号间干扰, 严重影响系统性能。本文用数值仿真的方法, 在忽略色散斜率和偏振模色散的情况下, 研究了系统各关键参数对系统传输性能的影响。仿真结果表明, 功率在8~12 dBm 之间时系统的误码率较低, 小于8 dBm 时系统误码率提高, 大于12 dBm 时也会降低系统性能。在单波长系统中色散应完全补偿, 补偿时宜采用少量预补偿。如果将色散补偿光纤模块置于普通光纤之后, 进入色散补偿光纤的光功率已经有较大衰减, 非线性效应大大减弱, 系统性能更优。脉冲占空比为0.15也即脉冲宽度为3.75 ps 时系统的性能较好, 随着脉冲占空比的增加, 系统误码率不断增大。而普通单模光纤的长度在80~120 km 时系统的误码率较低, 超过120km 后, 误码率急剧上升, 其变化原因有待进一步研究。

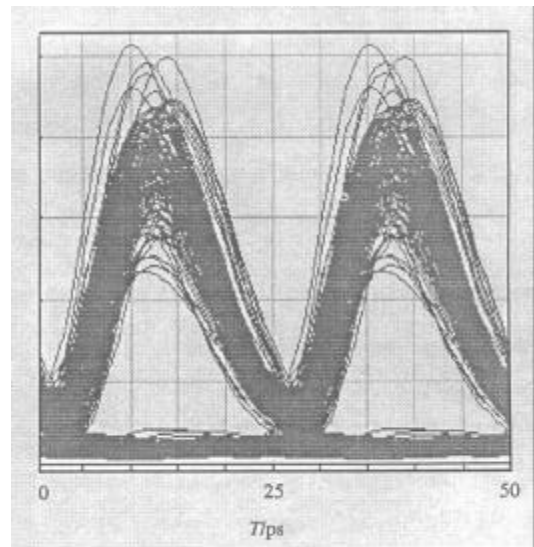


图14 接收信号眼图

## 参 考 文 献

- 1 Akihide S, Yutaka M, Shoichiro k, *et al.* A 40 Gb/s/ch WDM transmission with SPM/XPM suppression through prechirping and dispersion Management. *Journal of Lightwave Technol.*, 2000, 18(11):1519-1527
- 2 Ohhira R, Ogasahara D, Ono T. Novel RZ signal format with alternate-chirp for suppression of nonlinear degradation in 40 Gb/s based WDM. *WM2-1, OFC 2001*
- 3 Toshiaki O. Novel lossless optical transmission line with distributed Raman amplification. *4.4.3, ECOC' 2000*
- 4 Karsten R. Design of Distributed Raman Amplifiers. *4.4.1, ECOC' 2000*
- 5 Fariborz M M, Kazuro K. Design theory of long-distance WDM dispersion-managed transmission system. *Journal of Lightwave Thchnology*, 17(8): 1326-1335
- 6 Beate K, Klaus P. Optimum fiber dispersion in high-speed TDM systems. *IEEE Photon Technol Lett.*, 2001, 13(4): 299-301
- 7 Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*, 2nd ed. New York: Academic, 1995
- 8 Anderson C J, Lyle J A. Technique for evaluating system performance using  $Q$  in numerical simulations exhibiting intersymbol interference. *Electronics Letters*, 1994, 30(1):71-72
- 9 Marcuse D. Effect of fiber linearity on long-distance transmissin. *Journal of Lightwave Technolgy*, 1991, 9(2): 121-128
- 10 Bruer D, Petermann K. Comparison of NRZ- and RZ-modulation format for 40 Gb/s TDM standard-fiber systems. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1997, 9(4): 398-400
- 11 Caspar C. 10 Gbit/s NRZ/RZ transmission over 2000 km standard fiber with more than 100 km amplifier spacing. *Proc. ECOC' 97*, 1997
- 12 Weinert C M, Ludwig R, Pieper W, *et al.* 40 Gb/s and 4x40 Gb/s TDM/WDM standard fiber transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(11): 2276-2284

## · 科研成果介绍 ·

## 镍电极 MLC 陶瓷材料研究

主研人员：周晓华 张树人 朱文奕 钟朝位 游文男 余昌奎 郭曙光 蔡雪梅 许向华 程 媛 范义源  
陈忠道 杜广山

在国内率先研制开发了具有自主知识产权的抗还原 BaTiO<sub>3</sub>瓷料配方体系，研究了受主、施主及稀土离子等改性掺杂剂的作用机制和作用范围及该瓷料系统的抗还原机理。部分抗还原添加剂采用化学法制备，改善了 MLC 陶瓷介质的显微结构，提高了 MLC 性能的稳定性。

镍电极 MLC 陶瓷材料采用自行配制的混合剂对镍粉进行表面处理，使其具有一定的抗氧化和良好的分散性，满足了产品的要求；采用化学法制备的铜端电极浆料中的无机粘合剂和铜粉，铜端电极的可镀可焊性好，满足了表面安装的要求。还采用自行设计制造的管式气氛炉系统进行了抗还原瓷料和镍电极 MLC 的还原气氛烧结工艺实验，掌握了小批量烧结大容量镍电极 MLC 的优化工艺条件，成功实现了 25 kg 级投料实验。

· 渠 涌 ·