

文章编号: 0253-2239(2006)02-0166-5

基于绝热孤子压缩效应的小基座孤子脉冲研究*

贾东方 谈斌 王肇颖 葛春风 杨天新 倪文俊 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 高重复频率超短光脉冲产生技术是高速光时分复用(OTDM)系统的关键技术之一,而一般的超短脉冲源直接产生的脉冲往往不够窄,因此必须对光脉冲进行压缩后才能满足高速光通信系统的要求。采用 360 m 长的色散渐减光纤(DDF),成功将从再生锁模光纤激光器(RMLFL)输出的中心波长 1546 nm、重复频率 10 GHz、脉宽分别为 5.40 ps 和 4.60 ps 的光脉冲,绝热压缩为脉宽为 1.93 ps 和 1.71 ps 的小基座孤子脉冲,压缩因子分别为 2.80 和 2.69。利用这种绝热孤子压缩方法得到的光脉冲质量较好,可以用于 160 Gb/s 的光时分复用系统。

关键词: 导波与光纤光学; 孤子脉冲; 绝热孤子压缩; 色散渐减光纤; 再生锁模光纤激光器

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Study of Soliton Pulse with Small Pedestal Based on Adiabatic Soliton Compression Effects

Jia Dongfang Tan Bin Wang Zhaoying Ge Chunfeng Yang Tianxin
Ni Wenjun Li Shichen

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: The generation of ultra-short optical pulses with high repetition rate is one of the key technologies for high-speed optical time division multiplexing systems. However, the pulses directly generated by ordinal ultra-short pulse sources are usually not narrow enough. To meet the demand of high-speed optical communication systems, the pulses should be compressed. Using a 360 m dispersion decreasing fiber, 5.40 ps and 4.60 ps pulses with the repetition rate of 10 GHz and central wavelength of 1546 nm generated from a regeneratively mode-locked fiber laser (RMLFL) are adiabatically compressed into soliton pulses with pulse-width of 1.93 ps and 1.71 ps, respectively. The compression factors are 2.80 and 2.69, respectively. With a high quality and a small pedestal, the compressed soliton pulse can be applied to 160 Gb/s optical time division multiplexing system.

Key words: guided wave and fiber optics; soliton pulse; adiabatically soliton compression; dispersion decreasing fiber; regeneratively mode-locked fiber laser

1 引 言

在高速光时分复用(OTDM)通信系统以及与光纤非线性有关的技术中,高重复频率超短光脉冲的产生是关键技术之一。能直接产生超短脉冲固然很好,但对于数百 Gb/s 乃至 Tb/s 的光时分复用系统,要求光脉冲的宽度为皮秒、亚皮秒甚至飞秒量级,直接从调制光源得到如此窄的高质量脉冲已经不太现实,因而腔外脉冲压缩技术的地位显得越发重要。

在各种光脉冲压缩技术中,孤子效应压缩

(SEC)^[1,2],交叉相位调制(XPM)脉冲压缩^[3,4]以及绝热孤子压缩^[5~11](ASC)是比较成熟且应用较广的压缩方法。其中利用孤子效应压缩已经可以将被动锁模光纤激光器输出的皮秒脉冲压缩至 34 fs^[2],而利用交叉相位调制则将 10 fs 的光脉冲压缩到了 2~2.5 fs^[4],但是利用这两种方法得到的压缩脉冲往往含有基座。为了得到无基座的理想光脉冲,常采用绝热脉冲压缩技术,具体实现方式又通常包括色散渐减光纤(DDF)^[5,6]、梳状色散光纤

* 国家自然科学基金(60477022)、天津市科技发展基金(033800411)和天津大学青年教师基金资助课题。

作者简介: 贾东方(1971~),男,山东省枣庄市人,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: jiadf@163.com

收稿日期: 2005-03-04; 收到修改稿日期: 2005-07-11

(CDPF)^[7]、分布拉曼放大(DRA)^[8,9]、色散渐减光纤与分布拉曼放大相结合^[10,11]等等,这些方式各有利弊。目前,国外对绝热脉冲压缩技术的研究仍是一个热点,但国内的研究仅仅限于理论^[12~17],实验方面的报道尚不多见。本文利用 360 m 的色散渐减光纤,将现有再生锁模光纤激光器(RMLFL)直接输出约 5 ps 的脉冲,绝热压缩到 2 ps 以下,压缩因子 3 左右,而且脉冲质量较好,可以满足 160 Gb/s 光时分复用系统的要求。

2 再生锁模光纤激光器的实验装置

再生锁模光纤激光器的实验装置如图 1 所示^[18],激光器本身可以分为环形谐振腔和再生回路两部分。图中 ISO1+WDM+EDF+ISO2 和 980 nm 抽运构成掺铒光纤放大器(EDFA)(图中点划线框内部分);其中掺铒光纤(EDF)长 2 m,ISO1 和 ISO2 是两个光隔离器,WDM 是用于把 980 nm 抽运光耦合到腔内的波分复用器;色散位移光纤(DSF)长 100 m;TFF 表示 3 dB 线宽 2 nm、调谐范围 1528~1563 nm 的薄膜滤波器;80:20 耦合器用于耦合输出;PC,PC2 为偏振控制器;LN MOD 为 3 dB 带宽 10 GHz 的铌酸锂马赫-曾德尔型(M-Z)调制器。A、B 和 C 是腔内三个耦合输出部位,仅在需要测试时插入输出耦合器,否则视为直通光路。

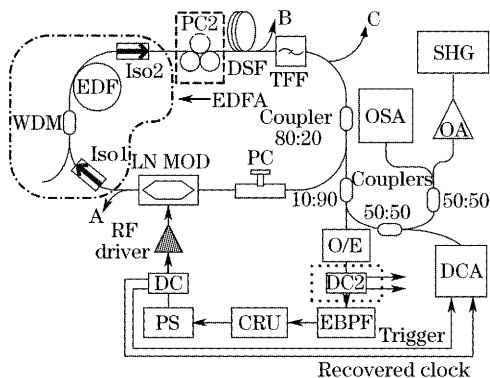


图 1 再生锁模光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the regeneratively mode-locked fiber laser (RMLFL)

再生回路器件包括光电转换模块(O/E),电带通滤波器(EBPF),时钟恢复单元(CRU),可调移相器(PS),定向耦合器(DC,DC2)和调制器射频驱动器(RF Driver)等。可调移相器为同轴型器件,工作频段 0~18 GHz,移相范围 0~2 π ;DC 工作频段也是 0~18 GHz,两个支路分别约为 -10 dB 和 -13 dB 耦合输出,用于供测试和提供触发时钟;DC2 只在再

生回路测试过程中用到,其余时间视为直通电路;调制器射频驱动器工作频段 0~12.5 GHz,小信号增益 13 dB,饱和输出功率 23 dBm;激光器输出通过 10:90 耦合器分别供 O/E 输入和实验测试用。

为了便于同时测试激光器输出的时域和频谱特性,在 10:90 耦合器的 90% 输出端接入了一个 50:50 耦合器,此耦合器的一端被连到 Agilent 86100B 40G 数字通信分析仪(DCA),另一端被连接到另一个 50:50 耦合器,相应的两路输出分别再被连接到 Ando AQ-6315A 光谱仪(OSA)和 FR-103MN 二次谐波自相关仪(SHG),自相关仪的分辨力 < 5 fs。为了满足自相关仪对测试信号的功率要求,还在其前面加了一个光放大器(OA)来放大信号。

3 基于色散渐减光纤的绝热孤子压缩方案实验研究

关于绝热孤子压缩方案的理论研究工作已经比较成熟,在此直接给出实验方案和结果,绝热孤子压缩实验装置如图 2 所示。

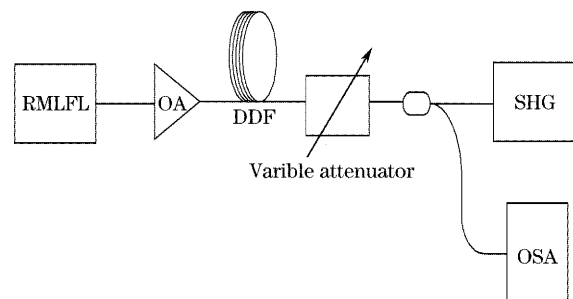


图 2 基于色散渐减光纤的绝热孤子压缩实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of adiabatic soliton compression based on dispersion decreasing fiber

目前实验室仅有的色散渐减光纤由 G. 652 光纤预制棒拉制得到,通过改变纤芯直径获得色散渐减效果,总长度 360 m。在波长为 1536.56 nm 处,测得始端色散为 15.31 ps/(nm·km),末端按线性色散渐减估算得到的色散约 5.09 ps/(nm·km),理论上绝热孤子压缩压缩因子(压缩前后脉宽之比)约为 3。对于脉冲的半峰全宽为 5 ps 左右的脉冲,光纤长度约对应 0.87 倍色散长度,不能满足无基座脉冲压缩条件,所以预期得到的压缩脉冲可能会有一定基座。

为了排除实验偶然性,得到比较可信的结论,下面对两种脉宽的压缩效果分别进行考察。首先通过调节再生锁模光纤激光器的抽运,得到如图 3 所示的波长为 1563 nm 的锁模输出。图 3(a)和图 3(b)分别表示再生锁模光纤激光器内 980 nm 激光二极管

(LD)在 100 mW 和 120 mW 两种抽运条件下得到的输出结果。经过换算,100 mW 和 120 mW 抽运情况下脉宽分别为 5.40 ps 和 4.60 ps,谱宽分别为 0.5 nm 和 0.7 nm,时间带宽积(TBP)为 0.34 和 0.40,后者略带啁啾。由于色散渐减光纤的始端色散较大,所以维持基态孤子所需功率较高。同时色散渐减光纤本身

衰减也很大,且和标准单模光纤(SMF)之间的连接存在较大的损耗,这些都对孤子条件提出更高的功率要求,因此实际采用的腔外放大器(EAD-200C)输出功率超过了 200 mW,图 4 为最终得到的压缩脉冲自相关迹和光谱图。

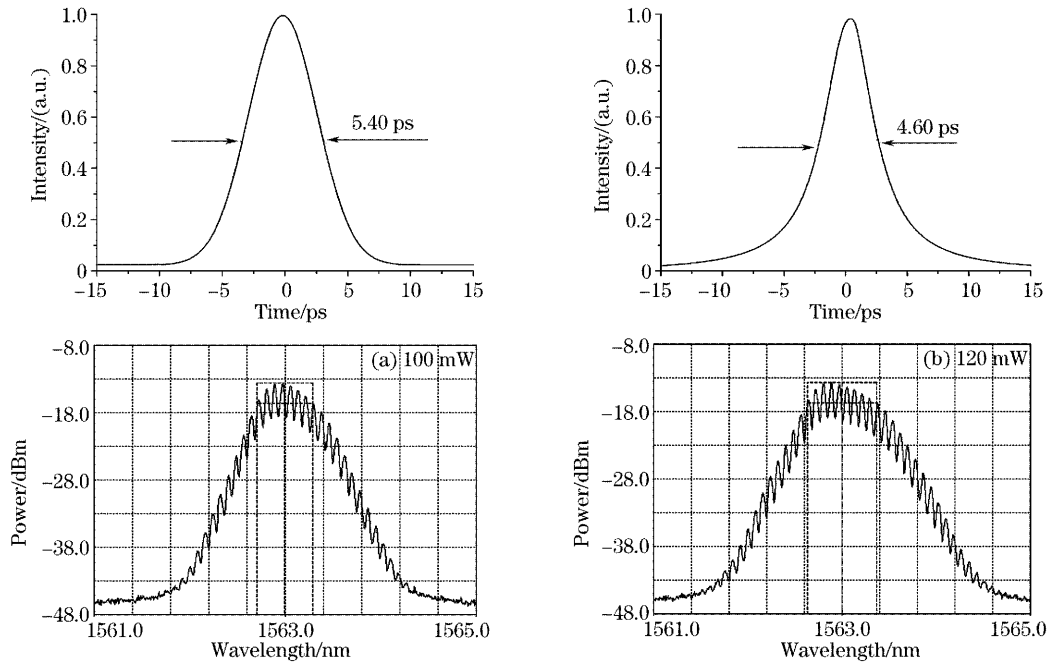


图 3 不同抽运功率下的初始脉冲自相关迹和光谱图

Fig. 3 Autocorrelation traces and spectra of the initial pulse with different pump powers

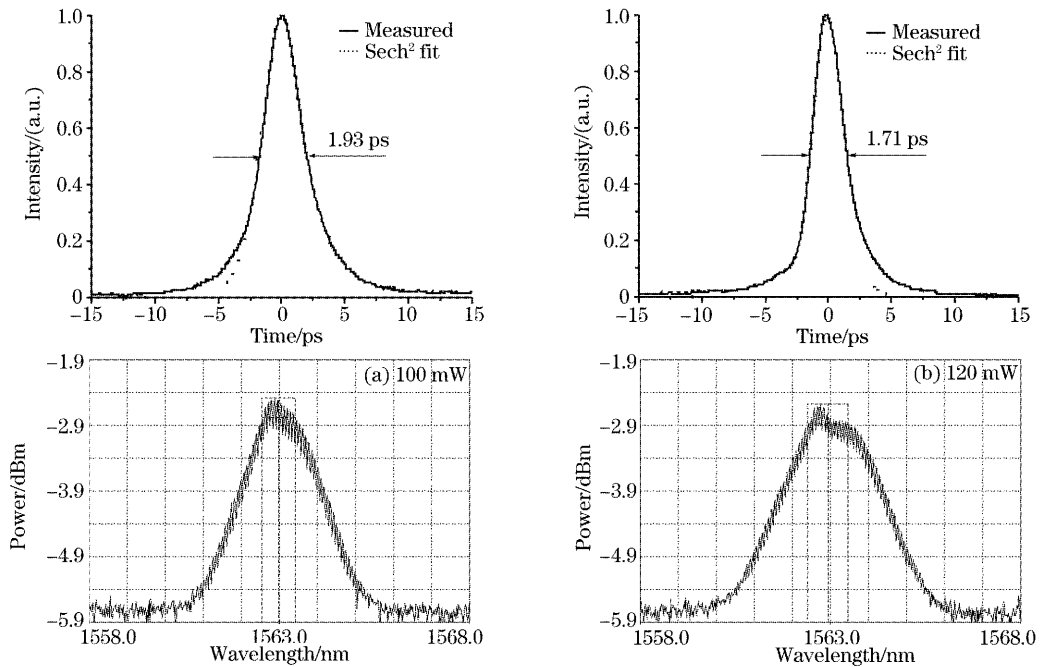


图 4 脉冲经色散渐减光纤压缩后的自相关迹和光谱图

Fig. 4 Autocorrelation traces and spectra of the pulse compressed by dispersion decreasing fiber

根据自相关迹图中的拟合曲线判断,压缩得到的脉冲是带有一定基座的类 Sech^2 脉冲,但基座比重并不是很大。图 4(a)中初始脉宽 5.40 ps 的脉冲经压缩后变为 1.93 ps,压缩因子约 2.80;图 4(b)中脉宽从 4.60 ps 压缩到 1.71 ps,压缩因子 2.69。因为绝热孤子压缩过程中所谓的色散渐减可以等效为增益,且考虑到色散渐减光纤较大的损耗,实际能获得的有效压缩能力将小于 3,从本实验来看,获得 2.80 和 2.69 的压缩因子应该是比较合理的。100 mW 情况下,光谱保持良好,谱宽 0.87 nm,时间带宽积为 0.21;120 mW 情况下,光谱发生形变,这是由于初始啁啾影响而致,谱宽约 1.05 nm,时间带宽积约为 0.22。时间带宽积都小于变换限孤子脉冲的 0.315,原因是脉冲含基座能量,并非真正的 Sech^2 脉冲,半峰全宽反应的只是孤子部分的脉宽。

这样,根据现有条件采用绝热孤子压缩获得了小于 2 ps 的孤子脉冲,这种脉冲虽然含有部分基座能量,但可以通过非线性光纤环形镜(NOLM)滤波来去除^[13]。唯一缺憾的是,受限于现有色散渐减光纤的质量和参量,无法得到 1 ps 左右的孤子脉冲,但由于脉冲质量较好,2ps 脉冲应该可以满足 160 Gbit/s 复用的要求。

4 结 论

光时分复用系统中脉冲压缩的目的是为了尽量提高复用信道数目,而最终这些脉冲是要经受传输考验的,因此脉冲质量才是至关重要的。从压缩效率、压缩后的脉冲质量以及光通信角度的可行性来看,基于色散渐减光纤的绝热孤子压缩相比其他压缩方案确实更胜一筹。只要色散渐减光纤参量得当,就可以得到时频域都很理想的孤子脉冲。然而,确保微扰条件或者说维持绝热条件就成为获得理想压缩的先决条件,否则会产生严重的基座现象,已有研究结论认为需要 6~8 倍色散长度才能确保基座能量小于 5%^[6]。那么对于一个半峰全宽约 10 ps 的脉冲来说,如果色散渐减光纤初始群速度色散(GVD)参量为 20 ps²/km,就需要 10 km 长色散渐减光纤。考虑到色散渐减光纤成品率较低,成本很高,不易拉长,所以只适用于几个皮秒或者亚皮秒量级脉冲的压缩。

由于我们研制的 10 GHz 再生锁模光纤激光器输出脉宽已经可以达到 5 ps 量级(增加抽运功率,现有的再生锁模光纤激光器预计可以直接输出 2~

3 ps 的脉冲),所以色散长度很小,一般需要的色散渐减光纤长度在 1 km 量级。实际上,利用仅 360 m 长的色散渐减光纤进行了绝热孤子压缩实验,成功获取了脉宽小于 2 ps 的可调谐小基座高质量孤子脉冲光源,可望用于 160 Gb/s 光时分复用系统。另外,根据经验,采用长度 1 km 左右、入射和出射端色散之比约 10 的色散渐减光纤,完全可以将 3 ps 脉冲压缩到 500 fs 以下,从而可以适用 640 Gb/s 的光时分复用系统。

参 考 文 献

- 1 K. A. Ahmed, C. C. Kai, H. F. Liu *et al.*. Femtosecond pulse generation from semiconductor lasers using the soliton-effect compression technique[J]. *Selected Topics in Quant. Electron.*, 1995, 1(2): 592~600
- 2 J. W. Nicholson, A. D. Yablon, P. S. Westbrook *et al.*. High power, single mode, all-fiber source of femtosecond pulses at 1550 nm and its use in supercontinuum generation[J]. *Opt. Exp.*, 2004, 12(13): 3025~3034
- 3 A. D. Ellis, D. M. Patrick. All laser diode compression of 5 GHz picosecond pulses using crossphase modulation in optical fiber[J]. *Electron. Lett.*, 1993, 29(2): 149~150
- 4 Michael Spanner, Misha Yu. Ivanov, Vladimir Kalosha *et al.*. Tunable optimal compression of ultrabroadband pulses by cross-phase modulation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(9): 749~751
- 5 S. V. Chernikov, D. J. Richardson, E. M. Dianov *et al.*. Picosecond soliton pulse compression based on dispersion decreasing fiber[J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(13): 1842~1844
- 6 A. Mostofi, H. H. Hanza, P. L. Chu. Optimum dispersion profile for compression of fundamental solitons in dispersion decreasing fibers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, 33(4): 620~628
- 7 S. V. Chernikov, J. B. Taylor, R. Kashyap. Comblike dispersion-profiled fiber for soliton pulse train generation[J]. *Opt. Lett.*, 1994, 19(8): 539~541
- 8 P. C. Reeves-Hall, J. R. Taylor. Wavelength and duration tunable sub-picosecond source using adiabatic Raman compression [J]. *Electron. Lett.*, 2001, 37(7): 417~418
- 9 T. E. Murphy. 10-GHz 1.3-ps pulse generation using chirped soliton compression in a Raman gain medium[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(10): 1424~1426
- 10 K. Igarashi, H. Tobioka, S. Takasaka *et al.*. Duration-tunable 100-GHz sub-picosecond soliton train generation through adiabatic Raman amplification in conjunction with soliton reshaping[C]. *OFC '2003*, 1: 155~156
- 11 T. Kogure, J. H. Lee, D. J. Richardson. Wavelength and duration-tunable 10-GHz 1.3-ps pulse source using dispersion decreasing fiber-based distributed Raman amplification[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(4): 1167~1169
- 12 Cao Wenhua, Liu Songhao. Amplification and compression of ultra short solitons in erbium-doped nonlinear amplifying fiber loop mirror I. Basic principles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1067~1072 (in Chinese)
曹文华, 刘颂豪. 掺铒光纤环镜中超短光孤子的放大与压缩 I. 基本原理[J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1067~1072
- 13 Chen Zhaoxi, Xu Wencheng, Jin Wei *et al.*. Improved method for the nonlinear optical loop mirror constructed from the dispersion decreasing fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, 32(4): 481~486 (in Chinese)

- 陈昭喜,徐文成,金伟等. 色散渐减光纤环形镜的一种改进方法[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 481~486
- 14 Zhang Shumin, Xu Wencheng, Luo Aiping *et al.*. Enhanced compression of femtosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(7): 599~602 (in Chinese)
张书敏,徐文成,罗爱平等. 色散缓变光纤中飞秒光脉冲的增强压缩[J]. 中国激光, 2001, **A28**(7): 599~602
- 15 Xia Guangqiong, Wu Zhengmao, Chen Haitao. Suppression of pulse walk off effect during the process of pulse compression by cross-phase modulation of pulse pair[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(3): 1167~1171 (in Chinese)
夏光琼,吴正茂,陈海涛. 基于脉冲对的交叉相位调制脉冲压缩中离散效应的抑制[J]. 物理学报, 2005, **54**(3): 1167~1171
- 16 Liu Jianhui, Ding Yongkui, Tan Li *et al.*. Study on pulse compression in dispersion decreasing fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1373~1377 (in Chinese)
刘俭辉,丁永奎,谭莉等. 色散渐减光纤的脉冲压缩研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(5): 1373~1377
- 17 Zhang Shumin, Lü Fuyun, Dong Fajie *et al.*. Enhanced compression of higher order femtosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1360~1363 (in Chinese)
张书敏,吕福云,董法杰等. 色散缓变光纤中飞秒高阶孤子脉冲的增强压缩[J]. 光子学报, 2004, **33**(11): 1360~1363
- 18 Bin Tan, Zhiyong Li, Zhaoying Wang *et al.*. Wavelength and duration tunable soliton generation from a regeneratively mode-locked fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 604~606

中国光学学会 2006 年学术大会

2006' General Congress of Chinese Optical Society

会议时间: 2006 年 9 月 3~5 日

会议地点: 中国·广州

主办单位: 中国光学学会

承办单位: 华南师范大学, 广东省光学学会

展馆地点: 中国·深圳 (2006 年 9 月 6~9 日)

协办单位: 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 广州光学学会, 深圳光学学会, 中国光学学会国际会议展览工作委员会, 中国国际光电博览会(深圳), 广州光学光电子行业协会, 深圳光学光电子行业协会

会议宗旨: 两年一次的中国光学学会年会, 将于 2006 年 9 月 3~5 日在广州举行。由华南师范大学和广东省光学学会具体承办。本次会议将总结交流我国光学、光子学和工程光学领域的最新成果, 展望 21 世纪的发展方向, 为新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议将与光学、光电子新技术和新产品大型国际展览会——中国国际光电博览会及中国光电产业高级论坛同期举行。

会议名誉主席: 王大珩(中国科学院)

会议主席: 母国光(南开大学)

节目委员会主席: 金国藩(清华大学)

组织委员会主席: 刘颂豪(华南师范大学)

大会秘书长: 邢达(华南师范大学)

大会安排 15 个专题会议(分会场): 1) 量子光学与非线性光学, 2) 生物与医学光学, 3) 激光物理与技术, 4) 光学功能材料, 5) 集成光子学与光纤光学, 6) 光通信与光传感, 7) 光学存储与光全息, 8) 工程光学与光学制造, 9) 光电技术与系统, 10) 光学薄膜技术, 11) 超快光学, 12) 光学微系统与微纳米技术, 13) 颜色光学、眼(科)光学和仪器, 14) 激光加工技术, 15) 光学教学研究

会议论文提交截止时间: 2006 年 6 月 15 日(论文提交请见会议网站及第二轮通知)

承办单位地址: 广州市华南师范大学信息光电子科技学院, 邮政编码: 510631

电话: +86-020-39310309, +86-020-85216848, **传真:** +86-020-39310311, **联系人:** 崔红丽, 罗爱平

电子邮箱: guangd@scnu.edu.cn (崔红丽), luoaiping2003@126.com (罗爱平)

本会议建立了会议网页, 网址为: <http://laser.scnu.edu.cn/final/index2.htm>。敬请大家访问浏览, 了解会议细节和相关的最新信息。