

文章编号: 0258-7025(2007)05-0675-05

# 基于微结构光纤的 10 GHz 超过 1100 信道的平坦超连续谱光源

徐永钊, 王子南, 张霞, 黄永清, 任晓敏

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 报道了一种基于微结构光纤的宽带、平坦超连续谱(SC)光源。利用锁模半导体激光器产生的1.6 ps, 重复率为10 GHz的光脉冲,通过一段80 m的色散平坦高非线性微结构光纤(HNL-MF),在1.55  $\mu\text{m}$ 波长区域产生了谱宽超过100 nm的平坦超连续谱。实验中采用的微结构光纤的非线性系数约为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。光纤具有小的正常色散和平坦的色散特性,在1550 nm波长处,光纤的色散值约为 $-0.58 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,而在1500~1650 nm波长范围内,光纤的色散值变化小于 $1.5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。实验获得的宽带、平坦超连续谱在1503~1593 nm宽达90 nm的波长范围内,具有 $\pm 2.5 \text{ dB}$ 的平坦度。该宽带、平坦超连续谱能同时提供波长间隔为10 GHz,超过1100路的多波长载波信道。通过对光谱滤波,获得了速率为10 Gbit/s的多波长脉冲序列。这样的超连续谱光源在波分复用(WDM)光通信系统、光波长变换等方面都有重要的应用。

**关键词** 光通信;微结构光纤;超连续谱;自相位调制

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A

## 10 GHz-Spaced over 1100 Channel Flat Supercontinuum Source Generated in a Microstructure Fiber

XU Yong-zhao, WANG Zi-nan, ZHANG Xia, HUANG Yong-qing, REN Xiao-min

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of Ministry of Education,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** The generation of a flat supercontinuum (SC) spectrum of over 100 nm in the 1.55  $\mu\text{m}$  region by injecting 1.6 ps, 10-GHz repetition rate optical pulses into an 80-m-long dispersion-flattened highly nonlinear microstructure fiber (HNL-MF) is demonstrated. The experimental microstructure fiber with a nonlinearity of  $\sim 11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  has small normal dispersion and is characterized by flattened chromatic dispersion. The chromatic dispersion is about  $-0.58 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  at 1550 nm, and it varies less than  $1.5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  between 1500 and 1650 nm. The generated flat broadband supercontinuum ranging from 1503 to 1593 nm has the flatness of  $\pm 2.5 \text{ dB}$ . This flat broadband supercontinuum can simultaneously supply more than 1100 multi-wavelength channels with 10-GHz spacing. The multi-wavelength pulse trains at 10 Gbit/s based on spectral slicing are also demonstrated. Such supercontinuum source has important applications, such as wavelength division multiplexing optical communication system and optical wavelength convertor.

**Key words** optical communication; microstructure fiber; supercontinuum; self-phase modulation

**收稿日期:** 2006-09-18; **收到修改稿日期:** 2006-12-12

**基金项目:** 国家 973 计划(2003CB314906)、教育部科学技术研究重大项目基金(104046)和北京市教育委员会共建项目(XK100130437)资助课题。

**作者简介:** 徐永钊(1972—),男,广东广州人,博士研究生,主要从事光纤通信、微结构光纤、非线性光纤光学方面的研究。  
E-mail: xyzlaser@gmail.com

**导师简介:** 任晓敏(1958—),男,山西孝义人,教授,博士生导师,主要从事光通信、通信光电子学、半导体光电子学方面的研究。  
E-mail: xmren@bupt.edu.cn

## 1 引 言

超连续谱(SC)在超短脉冲的产生、光谱检测、生物医学、光学相干层析、光计量学、光通信等许多领域都有着重要的应用。人们已经在多种传统光纤中得到了超连续谱。近年来,随着微结构光纤(MF)的发展,利用微结构光纤产生超连续谱的研究引起了人们极大的关注<sup>[1~8]</sup>。微结构光纤又称为光子晶体光纤或多孔光纤,与传统光纤不同,微结构光纤的纤芯通常由石英构成,而包层中沿光纤轴向排列着一系列的空气孔。通过改变纤芯的大小以及包层中空气孔的大小、排列及形状,可以灵活地控制光纤的色散和非线性特性<sup>[9,10]</sup>,而具有高非线性系数和适当色散条件的微结构光纤已被证实是产生超连续谱的优良介质,用这种类型的光纤可以在整个可见光区甚至近红外区产生超连续谱<sup>[11]</sup>。

对于超连续谱光源,光谱的宽度和平坦度是衡量光谱质量的两个重要因素,特别是对于波分复用(WDM)光通信系统,它要求在很宽的光通信波段范围提供功率均衡的多波长载波信道,而获得宽带平坦的超连续谱不仅能满足波分复用的带宽要求,又减少了功率均衡的技术难度,因此是很有吸引力的。为了产生宽带平坦的超连续谱,光纤的色散特征和抽运条件都必须满足一定的要求<sup>[12~14]</sup>。现在已经有利用微结构光纤在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长区域产生超连续谱的报道<sup>[15,16]</sup>。实验中,他们获得的超连续谱谱宽均在 $40\ \text{nm}$ 以内,而且光谱平坦度仍有待提高。

文献[13]表明,使用具有小正常色散的光纤和选择合适的抽运条件可以产生宽带、平坦的超连续谱。本文报道了利用重复率为 $10\ \text{GHz}$ 的皮秒脉冲和一段 $80\ \text{m}$ 的色散平坦高非线性微结构光纤(HNL-MF),在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长区域产生宽带、平坦超连续谱的实验。

## 2 实验装置

实验中使用的 $80\ \text{m}$ 色散平坦高非线性微结构光纤由 Crystal Fiber A/S 公司提供(NL-1550-NEG-1)。该光纤的中央由三重对称的3个纤芯构成光纤的混合纤芯,每个纤芯的直径约为 $2.1\ \mu\text{m}$ ,纤芯外是六角型规则排列的空气孔,图1为光纤的横截面图。光纤的非线性系数约为 $11\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,其色散曲线位于正常色散区,且具有小的正常色散值,在 $1510\sim 1620\ \text{nm}$ 波长范围内,

光纤的色散在 $-1.7\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 和0之间。同时,光纤具有平坦的色散特性,在 $1500\sim 1650\ \text{nm}$ 波长范围内,色散量的变化小于 $1.5\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,图2为光纤的色散曲线。在 $1510\sim 1620\ \text{nm}$ 波长范围内,光纤的损耗小于 $9\ \text{dB}/\text{km}$ 。为了便于与常规光纤连接并有利于光功率耦合进光纤,高非线性微结构光纤的两端分别接两段 $1\ \text{m}$ 过渡光纤,以致光纤的总损耗大于 $3.5\ \text{dB}$ 。

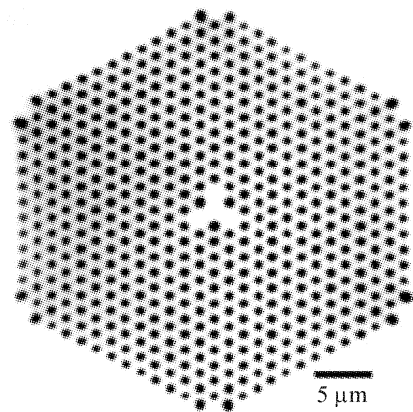


图1 高非线性微结构光纤截面的显微图

Fig. 1 Micrograph of the cross section of the HNL-MF

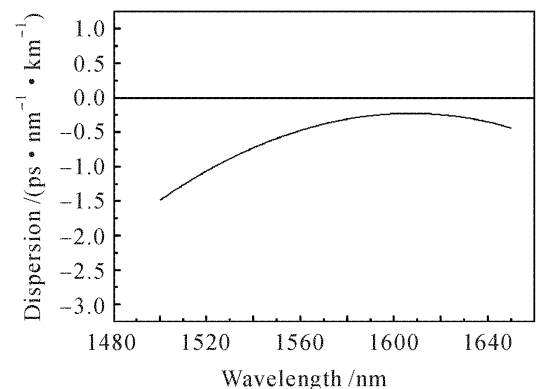


图2 光纤的色散曲线

Fig. 2 Dispersion profile of the fiber

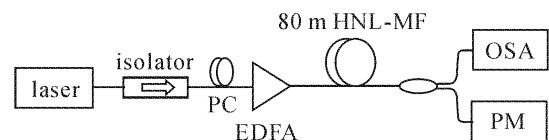


图3 实验装置图

OSA: 光谱分析仪; PM: 功率计; PC: 偏振控制器

Fig. 3 Experimental setup

OSA: optical spectrum analyzer; PM: power meter; PC: polarization controller

实验装置如图3所示。实验采用锁模半导体激光器作为激光光源,激光器输出重复率为 $10\ \text{GHz}$ ,中心波长为 $1550\ \text{nm}$ ,半峰全宽(FWHM)约为 $1.6\ \text{ps}$ 的脉冲序列,平均功率为 $-6\ \text{dBm}$ 。皮秒脉冲

经光隔离器和偏振控制器后,首先进入掺铒光纤放大器(EDFA)放大,然后再输入到80 m的高非线性微结构光纤。在光纤的输出端,光束被功分比为5:95的分束器分为两部分,其中95%的光功率输入到功率计,另外5%的光功率输入到光谱分析仪(ANDO-AQ6319),分别测量输出功率和输出光谱。

### 3 实验结果及分析

图4为输入高非线性微结构光纤的平均功率分别为32 dBm和35 dBm时,在1.55  $\mu\text{m}$ 波长区域产生的超连续谱。为了便于比较,图中同时给出了激光器输出脉冲的初始光谱。测量时,光谱仪的分辨率被设定为0.5 nm。由图可见,与初始光谱相比,通过高非线性微结构光纤后的光谱得到了极大的展宽。当输入功率为35 dBm时,光谱的展宽超过100 nm,且比较平坦,在1503~1593 nm宽达90 nm的波长范围内,光谱具有 $\pm 2.5$  dB的平坦度。在光纤的正常色散区,自相位调制效应(SPM)对光谱的展宽起主要作用。实验中可以观察到,随着入射功率的增加,光谱同时往短波长和长波长方向逐渐展宽,入射功率越高,光谱展宽也越宽。在光谱展宽过程中,整个光谱的顶部伴随着一系列的振荡小峰,且最外层谱峰的强度最大,在抽运波长的两侧,小峰的数目相等。光谱的多峰结构是由于脉冲内部频率相

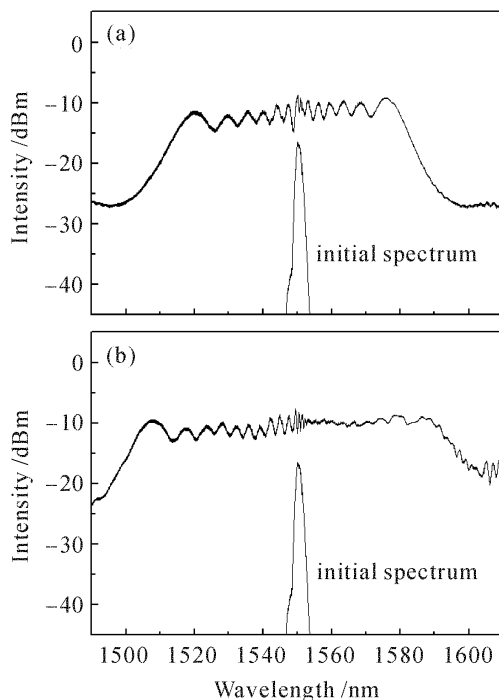


图4 输入平均功率为32 dBm(a)和35 dBm(b)时产生的超连续谱

Fig. 4 Generated SC spectra when the average input powers are 32 dBm (a) and 35 dBm (b)

同的光波相互干涉而造成的。光谱的这种结构特征正是自相位调制效应所致频谱展宽的表现。随入射功率的增加和光谱的展宽,小峰的振荡幅度逐渐减小,最后可以获得较为平坦的超连续谱。可以注意到,光谱被不对称展宽,这是由于在抽运波长处,色散曲线具有一定的色散斜率,高阶色散引起了光谱的不对称展宽。同时,高功率的短脉冲在小色散光纤中传输,高阶非线性效应也会对频谱的不对称展宽有一定的影响。脉冲的功率越高,影响越显著。可以预见,如果抽运波长选择在色散斜率为零的位置,并合理选择抽运功率,可以产生对称性较好的超连续光谱。

在高非线性微结构光纤的输出端,我们同时测量了输出的总功率,发现功率损耗比较大。对于32 dBm和35 dBm的输入功率,输出功率分别为

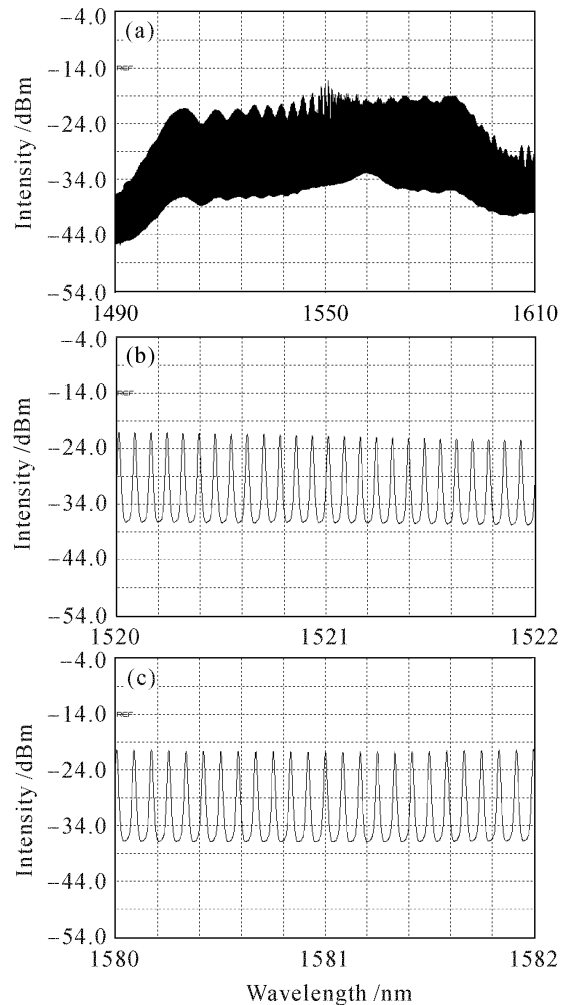


图5 分辨率为0.01 nm时,在1490~1610 nm波长范围内的超连续谱(a),在1521 nm波长附近的光谱放大图(b)和在1581 nm波长附近的光谱放大图(c)

Fig. 5 SC spectra with the resolution of 0.01 nm in the 1490 ~ 1610 nm wavelength range (a), in magnified scale at around 1521 nm (b) and in magnified scale at around 1581 nm (c)

27.2 dBm和30.2 dBm,损耗达4.8 dB。这些损耗主要由于微结构光纤本身以及它和常规光纤的连接欠佳,使得光纤总损耗较大。因此提高微结构光纤和常规光纤的连接质量,并减小光纤自身的损耗,可以使产生相同谱宽的超连续谱所需要的输入功率大为降低。此外,采用更长的光纤和选择更窄的抽运脉冲,均可以用更低的输入功率产生谱宽相同的超连续谱。

将光谱仪的分辨率设定为0.01 nm,输入功率为35 dBm,可以进一步观察到超连续谱的精细结构。由图5可见,超连续谱是由一系列并不连续的窄带光谱组成,每一个窄带光谱可作为一个单独的载波信道,信道间隔为10 GHz(0.08 nm),它们组成了一系列的光频率序列。由光谱图还可以测量出窄带光谱的谱峰和谷底的差值,这个值可以反映超连续谱多波长载波信道的光信噪比(OSNR)。图5中的超连续谱的光信噪比约16 dB左右,平坦区域约为90 nm,因此该宽带、平坦超连续谱能同时提供波长间隔为10 GHz,超过1100路多波长载波信道。通过在不同波长处滤波,可以获得多波长脉冲序列。图6为利用带宽为0.8 nm的可调谐滤波器,在不同波长处对超连续谱滤波获得的短脉冲序列。其中图6(a)为激光器输出的初始脉冲,图6(b),(c)和(d)分别为在1530 nm,1555 nm和1570 nm波长处滤波获得的短脉冲序列,其速率与抽运脉冲的相同,均为10 Gbit/s。由于在不同波长处超连续谱的强度稍有不同,因此在不同波长处滤波获得的脉冲序列的强度也稍有差别。通过调整滤波器的带宽,可以调节滤波

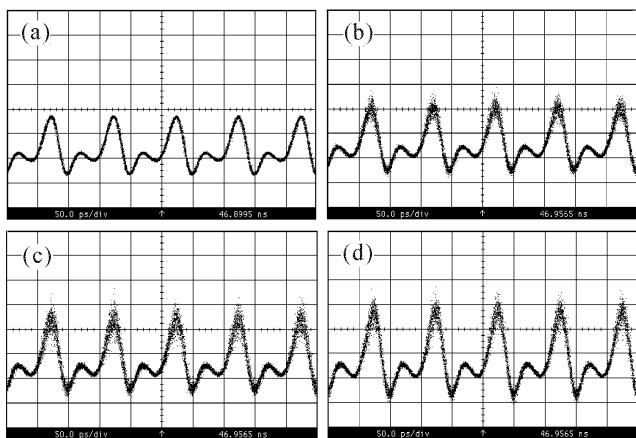


图6 激光器输出的初始脉冲(a)以及在1530 nm(b), 1555 nm(c)和1570 nm(d)波长处对超连续谱滤波获得的脉冲序列

Fig. 6 Initial pulses train output from the laser (a) and the pulses train filtered out from the SC spectrum at 1530 nm (b), at 1555 nm (c) and at 1570 nm (d)

后的脉冲宽度。如果采用阵列波导光栅(AWG)对光谱滤波,则可以同时获得多波长载波信道。

## 4 结 论

在光谱展宽的过程中,自相位调制效应起主要的作用,输入功率越高,光谱展宽越宽。通过减小光纤总的损耗、增加光纤长度以及选择更窄的抽运脉冲,均可以用较低的输入功率产生谱宽相同的超连续谱。这样的超连续谱光源在波分复用光通信系统、波长变换等方面都有重要的应用,而适合产生宽带、平坦超连续谱的微结构光纤同样具有重要的研究价值。

## 参 考 文 献

- 1 J. M. Dudley, L. Provino, N. Grossard *et al.*. Supercontinuum generation in air-silica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4):765~771
- 2 G. Genty, M. Lehtonen, H. Ludvigsen. Effect of cross-phase modulation on supercontinuum generated in microstructured fibers with sub-30 fs pulses [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19):4614~4624
- 3 Peiguang Yan, Yaqing Jia, Hongxin Su *et al.*. Broadband continuum generation in an irregularly multicore microstructured optical fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):355~357
- 4 Song Xuepeng, Chen Bo, Lin Jianfei *et al.*. Supercontinuum generation in multi-core microstructure fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1066~1068  
宋学鹏,陈波,林健飞等.多芯微结构光纤产生超连续谱[J].*中国激光*, 2006, **33**(8):1066~1068
- 5 Yu Yongqin, Ruan Shuangchen, Du Chenlin *et al.*. Spectral broadening in the 1.3  $\mu\text{m}$  region using a 1.8-m-long photonic crystal fiber by femtosecond pulses from an optical parametric amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):481~484
- 6 Jia Yaqing, Yan Peiguang, Lü Kecheng *et al.*. Experimental study and numerical analysis of femto second pulse propagation and supercontinuum generation in highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(4):1809~1814  
贾亚青,闫培光,吕可诚等.高非线性光子晶体光纤中飞秒脉冲的传输特性和超连续谱产生机制的实验研究及模拟分析[J].*物理学报*, 2006, **55**(4):1809~1814
- 7 Yu Yongqin, Ruan Shuangchen, Du Chenlin *et al.*. Supercontinuum generation using a polarization-maintaining photonic crystal fiber by a regeneratively amplified Ti:sapphire laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(2):384~387
- 8 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Frequency conversion in a birefringent microstructure fiber by femtosecond pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):613~616  
胡明列,王清月,栗岩峰等.飞秒激光脉冲在双折射微结构光纤中频率变换的研究[J].*中国激光*, 2005, **32**(5):613~616
- 9 Wang Jian, Yu Chongxiu. Effect of hetero-diameters of cladding air holes on nonlinearity coefficient of microstructured optical fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):775~778  
王健,余重秀.包层空气孔径的不均匀性对微结构光纤非线性系数的影响[J].*中国激光*, 2006, **33**(6):775~778
- 10 Wu Jinqing, Xue Wenrui, Zhou Guosheng. Dispersion property analysis of square-lattice varying microstructured optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):174~178

- 武劲青, 薛文瑞, 周国生. 方形渐变空气孔微结构光纤的色散特性分析[J]. 光学学报, 2005, **25**(2):174~178
- 11 V. V. Ravi Kanth Kumar, A. K. George, W. H. Reeves *et al.*. Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25):1520~1525
- 12 K. Mori, H. Takara, S. Kawanishi. Analysis and design of supercontinuum pulse generation in a single-mode optical fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(12):1780~1792
- 13 Xu Yongzhao, Ren Xiaomin, Zhang Xia. Flat supercontinuum generated in a single-mode optical fiber with a new chromatic dispersion profile [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(8):1923~1926
- 14 Gao Jieli, Xu Wengcheng, Liang Zhanqiang *et al.*. Supercontinuum spectrum generation in an optical fiber with a concave dispersion profile [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1590~1594
- 高洁丽, 徐文成, 梁湛强 等. 凹形色散分布光纤中超连续谱特性分析[J]. 光学学报, 2005, **25**(12):1590~1594
- 15 Z. Yusoff, P. Petropoulos, K. Furusawa *et al.*. A 36-channel 10-GHz spectrally sliced pulse source based on supercontinuum generation in normally dispersive highly nonlinear holey fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12):1689~1691
- 16 T. Yamamoto, H. Kubota, S. Kawanishi. Supercontinuum generation at 1.55  $\mu\text{m}$  in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(13):1537~1540

## 2007 亚洲光电子国际会议 (Photonics Asia 2007) 11 月将在京召开

由中国光学学会和国际光学工程学会(SPIE)联合举办的 2007 亚洲光电子国际会议(Photonics Asia 2007)将于 2007 年 11 月 11~15 日在中国北京召开。

大会主席是中国光学学会理事长周炳琨院士和 2007 SPIE 主席 Mr. Brian Culshaw。王大珩院士和母国光院士担任大会名誉主席。

亚洲光电子会议是亚洲最大的光学、光电子学学术交流和产业交流的盛会。会议将对学科的最新发展趋势、技术应用、产品发布、市场分析、投资调研等各类问题进行广泛的讨论和交流。会议将举行大会特邀报告、专题报告和高层专家报告会, 会议附设光学和光电子学最新成果展览。

会议共设如下 22 个专题。

- PA01: High Power Lasers  
 PA02: Semiconductor Lasers and Applications  
 PA03: Laser in Material Processing and Manufacturing  
 PA04: Optics in Health Care and Biomedical Optics  
 PA05: Quantum Optics and Applications in Computing and Communications  
 PA06: LED Materials and Devices  
 PA07: Advanced Materials and Devices for Sensing and Imagine  
 PA08: Advanced Sensor Systems and Applications  
 PA09: Nanophotonics, Nanostructure and Nanometrology  
 PA10: Holography, Diffractive Optics and Applications  
 PA11: Electronic Imaging and Multimedia Technology  
 PA12: Optical Design and Testing  
 PA13: Advances in Optical Data Storage Technology  
 PA14: Infrared Technologies and Applications  
 PA15: MEMS/MOEMS Technology and Applications  
 PA16: Information Optics and Photonics Technology  
 PA17: Optoelectronic Devices and Integration  
 PA18: Advanced Microlithography Technology  
 PA19: Nonlinear Optics and Applications  
 PA20: Terahertz Photonics  
 PA21: Solar Energy Technology and Application  
 PA22: Solid state lighting

会议论文将通过专家审稿, 录用的文章将收录到 SPIE 论文集中。该论文集将被 EI, INSPEC, ISI, AIAA 以及其他重要学术检索刊物检索。

在线投稿网站 [www.spie.org](http://www.spie.org)。提交摘要和论文需同时发送到电子邮箱 [photoasia2007@gmail.com](mailto:photoasia2007@gmail.com), 邮件主题按照“专题号码-作者中文姓名-论文标题”编写。会议摘要截稿日期 2007 年 6 月 15 日。

会议国内网站: [www.coscn.org](http://www.coscn.org)

联系人: 翟林 [zhailin@hotmail.com](mailto:zhailin@hotmail.com) Tel: 010-62641108, 13651149955

李翠玲 [cuilingli@bit.edu.cn](mailto:cuilingli@bit.edu.cn) Tel: 010-68912564, 13521121045

丁伯瑜 [dingboyu@sohu.com](mailto:dingboyu@sohu.com) Tel: 010-68912564, 13661197335

通信地址: 100081 北京海淀区中关村南大街 5 号北京理工大学光电工程系 李翠玲 丁伯瑜