

文章编号: 0253-2239(2008)07-1400-05

# 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器

刘为俊<sup>1</sup> 饶云江<sup>1,2</sup> 冉曾令<sup>1</sup> 廖 弦<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学宽带光纤传输与通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)  
<sup>2</sup> 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要** 提出了一种新型的光纤法布里-珀罗(F-P)折射率传感器,该传感器由单模光纤端面靠近该端面的由 157 nm 激光加工而成的短空气腔构成。短空气腔两个端面的反射光和光纤头端面的反射光发生干涉形成了传感器的反射干涉条纹。干涉条纹的对比度受光纤头端面外部的折射率影响,在干涉条纹包络的波谷处具有最大的对比度,外部待测折射率可通过计算该处的对比度得到。传感器对温度不敏感,测量范围广。在 1.33 至 1.441 范围内,折射率灵敏度约为 27 dB,分辨率约为  $1.12 \times 10^{-4}$ ;在 1.45~1.62 范围内,折射率灵敏度约为 24 dB,分辨率约为  $1.26 \times 10^{-4}$ 。

**关键词** 光学测量; 折射率; 光纤法布里-珀罗传感器; 条纹对比度; 温度不敏感

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082807.1400

## Novel Fabry-Pérot Fiber-Optic Refractive-Index Sensor Based on Laser Micromachining

Liu Weijun<sup>1</sup> Rao Yunjiang<sup>1,2</sup> Ran Zengling<sup>1</sup> Liao Xian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks (Ministry of Education of China), University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)  
(<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronic Technology & Systems (Ministry of Education of China), Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** A novel Fabry-Pérot (F-P) fiber-optic sensor for refractive index (RI) measurement is proposed. The sensor consists of a single-mode fiber end surface and a short air cavity which is close to this surface and produced by 157 nm laser micromachining. The light reflected from the end surface interferes with the light reflected from the air cavity. The fringe contrast of interference from the reflection spectrum of the sensor is influenced by the refractive index to be measured outside. The maximal contrast exists in the trough of the fringe envelop, and the refractive index outside can be gained through this contrast. The sensor can provide temperature-independent measurement of wide range of RI. In the range of 1.33~1.44, the RI sensitivity is about 27 dB, with resolution about  $1.12 \times 10^{-4}$ ; and in the range of 1.45~1.62, the RI sensitivity is about 24 dB, with resolution about  $1.26 \times 10^{-4}$ .

**Key words** optical measurement; refractive index; fiber-optical Fabry-Pérot sensor; fringe contrast; temperature-independence

## 1 引 言

光纤折射率(RI)传感器如光纤表面等离子体共振(SPR)折射率传感器<sup>[1~4]</sup>、光纤光栅型折射率传感器<sup>[5~10]</sup>和光纤干涉型折射率传感器<sup>[11~13]</sup>,以其耐腐蚀、抗电磁干扰、高精度等优良特性而受到广泛

关注。但同时这些传感器还存在一些需要克服的不足之处。SPR 折射率传感器具有高精度和实时响应的优点<sup>[1,2]</sup>,但其成本较高。所使用的金属(如银和金)的 SPR 吸收峰值位于 300~1000 nm 波长范围内,与光纤通信中的 1550 nm 处波段不兼容。此

收稿日期: 2007-11-26; 收到修改稿日期: 2007-12-29

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(60537040)资助课题。

作者简介: 刘为俊(1983-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感及其信号处理等方面的研究。E-mail: lwj120@163.com

导师简介: 饶云江(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光通信器件与光纤传感等方面的研究。

E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

外,SPR 折射率传感器对周围温度敏感,在光纤上镀高质量金属膜也较为困难。光纤光栅型折射率传感器<sup>[5~8]</sup>能工作在 1550 nm 波段,但它不够灵敏,易受温度波动的影响。长周期光纤光栅型折射率传感器的性能受到非线性特性的进一步限制,只对很小的折射率范围敏感<sup>[5,6,8]</sup>。传统的法布里-珀罗干涉型传感器<sup>[11,12]</sup>以反射谱的相位作为对外界待测物理量的响应,从原则上能提供低热敏度的绝对测量。尽管光纤法布里-珀罗折射率传感器已经成功商用,但其可靠性受到液体填充过程中沉积在腔内的污染物的严重影响。另一种微米级光纤法布里-珀罗折射率传感器<sup>[11]</sup>,由一小段包层受腐蚀的多模光纤和一根与其熔接的单模光纤构成。两种光纤的折射率差别很小,传感器的光学性能较差。此外它对温度敏感,对折射率的响应是非线性的。

本文提出一种新型光纤法布里-珀罗折射率传感器来测量光纤头外的液体折射率,液体不需要填充进法布里-珀罗腔内。传感器可测量大于 1 的所

有折射率,且对温度不敏感。

## 2 传感器结构与分析

传感器的结构如图 1(a)所示,在单模光纤上靠近光纤头处内嵌一个空气腔。光纤头插入待测介质中测量其折射率。传感头有三个反射面,分别为 1, 2 和 3。反射面 1 和 2 形成一短腔,用腔 1 表示;反射面 2 和 3 形成另一个腔,用腔 2 表示。还有一个长腔,腔 3,由反射面 1 和 3 形成。纤芯和液体的折射率分别用  $n_0$  和  $n'$  表示。由于光纤的热光系数很小( $6.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),光纤的折射率在正常的工作温度范围内可视为常数。反射面 1 和 2 的功率反射系数  $R_1$  和  $R_2$  均等于  $(n_0 - 1)^2 / (n_0 + 1)^2 = 0.034 \ll 1$ ,而反射面 3 的功率反射系数  $R_3$  取决于液体的折射率,表示为  $(n_0 - n')^2 / (n_0 + n')^2$ ,在实际情况中也远小于 1。腔 1、腔 2 和腔 3 的长度分别表示为  $L_1$ ,  $L_2$ , 和  $L_1 + L_2$ 。由于光纤极低的热膨胀系数( $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),各腔长在正常工作温度范围内也视为常数。

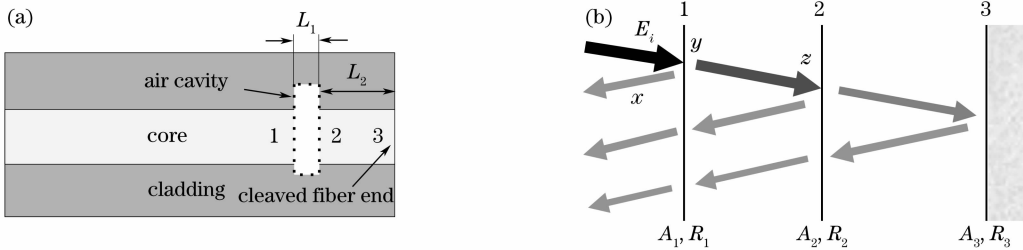


图 1 (a)传感头结构示意图,(b)三个端面的电场反射图( $E_i$  实际为垂直入射)

Fig. 1 Structure of the sensor head, (b) reflective field amplitude on three surfaces

图 1(b)显示了三个反射面的电场强度示意图,  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  分别表示为光穿过端面 1、2 和 3 的传输损耗因子,  $\beta$  为传播常数,  $\alpha$  为光纤穿过腔 1 时的散射损耗。腔 2 为一小段光纤,其传输损耗被忽略。场强为  $E_i$  的光垂直入射到端面 1,则反射场强为

$$X = E_i R_1^{1/2},$$

透射场强为

$$Y = E_i (1 - A_1)^{1/2} (1 - R_1)^{1/2},$$

$Y$  经过腔 1 后入射到端面 2 的场强为

$$Z = E_i (1 - A_1)^{1/2} (1 - R_1)^{1/2} (1 - \alpha)^{1/2} \times \exp(-j\beta L_1),$$

依此类推。由于从光密介质反射,端面 2 的反射电场存在半波损失。当  $n' > n_0$  时,端面 3 的反射也会存在半波损失。传感器的总体反射电场  $E_r$  可近似表示为三个端面的一阶反射电场的和。端面的反射系数很低,高阶反射电场的功率和占输入电场功率的比例小于 0.1%,因此可省去。总体反射电场的归一化值  $E_r/E_i$  可表示为

$$\frac{E_r}{E_i} = \sqrt{R_1} + (1 - A_1)(1 - \alpha)(1 - R_1) \sqrt{R_2} \exp(-j2\beta L_1 + j\pi) + (1 - A_1)(1 - A_2)(1 - \alpha)(1 - R_1)(1 - R_2) \sqrt{R_3} \exp[-j2\beta(L_1 + n_0 L_2)], \quad n' \leq n_0 \quad (1)$$

$$\frac{E_r}{E_i} = \sqrt{R_1} + (1 - A_1)(1 - \alpha)(1 - R_1) \sqrt{R_2} \exp(-j2\beta L_1 + j\pi) + (1 - A_1)(1 - A_2)(1 - \alpha)(1 - R_1)(1 - R_2) \sqrt{R_3} \exp[-j2\beta(L_1 + n_0 L_2) + j\pi], \quad n' > n_0 \quad (2)$$

(1)式,(2)式模的平方值分别描述了上两种情况下的传感器反射谱干涉图案[其形如图 2(a)],相应地用(3)

式和(4)式表示,其中考虑到  $L_1 \ll L_2$ :

$$R = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 \approx \begin{cases} R_1 + M^2 + N^2 - 2\sqrt{R_1}M\cos(2\beta L_1) + 2N(\sqrt{R_1} - M)\cos(2n_0\beta L_2), & n' \leq n_0 \\ R_1 + M^2 + N^2 - 2\sqrt{R_1}M\cos(2\beta L_1) - 2N(\sqrt{R_1} - M)\cos(2n_0\beta L_2), & n' > n_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $M = (1 - A_1)(1 - \alpha)(1 - R_1)\sqrt{R_2}$ ,  $N = (1 - A_1)(1 - A_2)(1 - \alpha)(1 - R_1)(1 - R_2)\sqrt{R_3}$ .

在干涉图案包络波谷处,对比度最大,即细条纹的波峰幅度值  $R(\lambda_2)$  与波谷幅度值  $R(\lambda_1)$  之差最大[见图 2(b)],选取此处的对比度  $10\lg[R(\lambda_2)/R(\lambda_1)]$  来确定  $n'$ :

$$R_{\text{atio}} = 10\lg\left[\frac{R(\lambda_2)}{R(\lambda_1)}\right] \approx 10\lg\left[\frac{R_1 + M^2 + N^2 - 2\sqrt{R_1}M + 2N(\sqrt{R_1} - M)}{R_1 + M^2 + N^2 - 2\sqrt{R_1}M - 2N(\sqrt{R_1} - M)}\right], \quad (5)$$

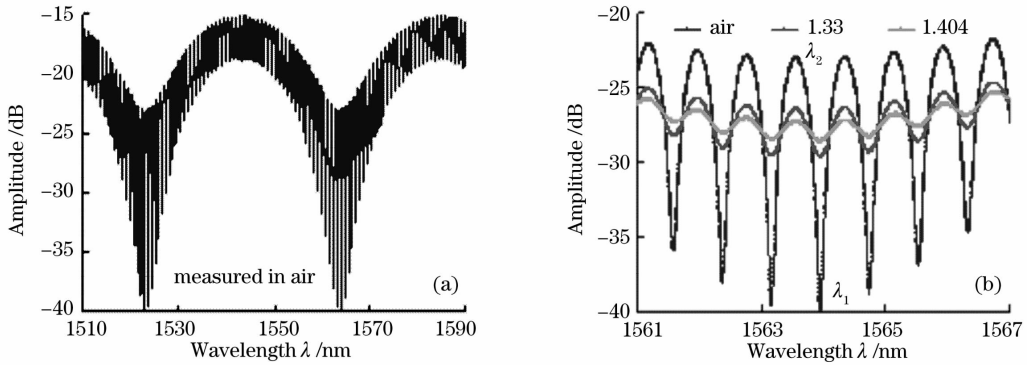


图 2 (a) 传感器在空气中的反射谱, (b) 在  $n' = 1.0$  (空气), 1.33, 和 1.404 时的条纹局部放大图

Fig. 2 (a) Reflection spectrum of the sensor measured in air, (b) close-up displays of the fringes for  $n' = 1.0$  (air), 1.33, and 1.404, respectively

(5)式适用于(3)式和(4)式,(3)式和(4)式中的细条纹的相位相差  $\pi$ ,通过此相位差,可判断为  $n' \leq n_0$  或  $n' > n_0$ 。光纤的热光系数和热膨胀系数都很小,因此测量对温度不敏感,不需要做温度补偿。

### 3 实验结果与讨论

为制作该传感器,首先采用 157 nm 激光微加工系统在单模光纤端面中心加工一直径为 56  $\mu\text{m}$ ,深度为 23  $\mu\text{m}$  的圆柱形小孔。激光加工系统的组成包括 157 nm 脉冲激光(Coherent, LFP202),光聚焦系统,观察系统和精密移动台。脉冲能量密度、脉冲宽度、脉冲重复率和脉冲数分别为 12  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 15 ns, 20 Hz 和 80。微孔直径大于纤芯但小于包层,如图 3(a)所示。第二步将该带有微孔的光纤与另一光纤熔接形成空气腔。最后,在距离空气腔一小段距离的地方切下光纤,完成传感器。传感头的显微图像如图 3(b)所示。空气腔的长度为 29  $\mu\text{m}$ ,腔 2 的长度为 1014  $\mu\text{m}$ 。实验装置如图 3(c)所示。

实验中,将传感头浸入丙三醇溶液( $n' < 1.45$ )和二硫化碳与酒精混合溶液( $1.45 < n' < 1.62$ )。溶液的折射率通过改变溶剂的浓度控制。光谱分析仪(Agilent, Model 86142B)为传感器提供宽带光源,同时测量其反射谱。折射率的测试范围为 1.33 ~

1.62。传感器在空气中的反射谱如图 2(a)所示。几个不同折射率情况下的反射谱在 1564 nm 附近波谷处的放大如图 2(b)所示: $n' = 1.0$  (空气)、1.33 (水)、1.404 (丙三醇溶液)。

将干涉条纹的理论表达式与在空气和水中测得的实验数据相比较,同时考虑到  $A_1 = A_2$ ,  $L_1$  很小,  $\alpha = 0$ ,得出  $A_1 = A_2 = 0.4$ 。因此(3)式和(4)式中各参量分别为: $R_1 = R_2 = 0.034$ ,  $L_1 = 29 \mu\text{m}$ ,  $L_2 =$

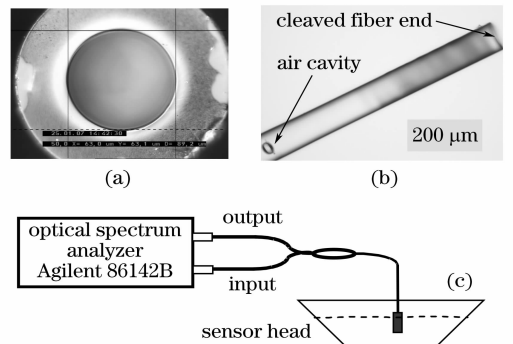


图 3 (a) 光纤横截面上微加工小孔的显微图像, (b) 传感头的显微图像, (c) 折射率测量的实验装置

Fig. 3 (a) Microscopic image of the micromachined hole on the fiber cross section, (b) microscopic image of the fabricated sensor head, (c) experimental setup for refractive-index sensing

1014  $\mu\text{m}$ ,  $A_1 = A_2 = 0.4$ ,  $\alpha = 0$ 。

通过(5)式和实验测得的条纹对比度随  $n'$  的变化见图 4, 两种结果基本吻合。在 1.33 至 1.441 范围内, 对比度按线性变化, 共改变了 3 dB, 相应的折射率灵敏度约为 27 dB。在 1.45~1.62 范围内, 对比度按非线性变化, 共改变了 3.9 dB, 相应的折射率灵敏度约为 24 dB。折射率的分辨率受到光谱仪的幅度分辨率(0.001 dB)的影响。在 0.001 dB 对比度分辨率情况

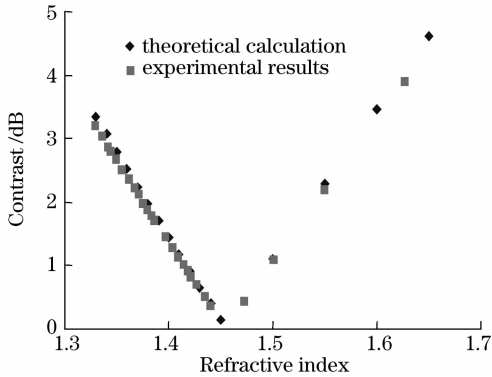


图 4 对比度的变化相对于折射率的范围

Fig. 4 Variation of contrast with the refractive index

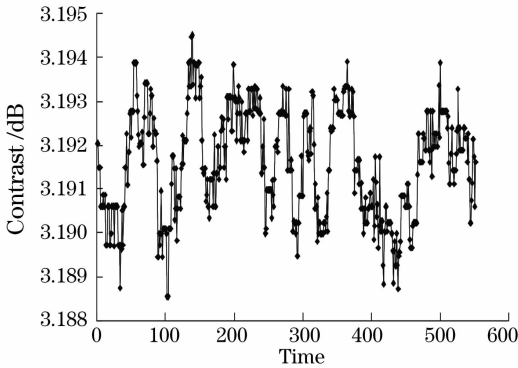


图 5 两小时内的对比度变化

Fig. 5 Variation of contrast in 2 h

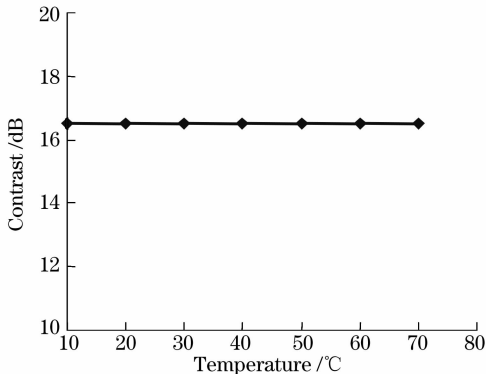


图 6 空气中的对比度随温度的变化

Fig. 6 Variation of contrast measured in air with temperature

下, 折射率分辨率在 1.33~1.441 和 1.45~1.62 线性范围内分别约为  $3.7 \times 10^{-5}$  和  $4.2 \times 10^{-5}$ 。在实际测量中考虑到测量系统内各种器件及线路的影响和干扰, 传感器在  $n' = 1.33$  时连续测量两个小时的结果见图 5, 其最大误差为 0.003 dB, 因此测量系统在 1.33~1.441 和 1.45~1.62 线性范围内分辨率分别约为  $1.12 \times 10^{-4}$  和  $1.26 \times 10^{-4}$ 。空气中对比度的温度相关性如图 6 所示。在 0~70  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内, 对比度保持不变。

### 4 结 论

传感器对温度不敏感, 测量范围广。传感器展现出许多优良特性, 包括宽的折射率测量范围、良好的线性度、高分辨率、操作简单、低热敏度、可大量制作、低制作成本、小尺寸、可靠性好等。通过优化激光微加工系统的操作参量增加条纹对比度, 传感器的性能可进一步提高。在光谱分析仪中采用高精度的 A/D 转换器可提高对比度的分辨率, 进而也提高折射率的分辨率。传感器有望在生物医学方面获得广泛的应用, 如 DNA 序列的检测, 抗原抗体的检测。

### 参 考 文 献

- 1 Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu *et al.*. Reflective optical fiber surface plasma wave resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 404~409  
曾捷, 梁大开, 曾振武等. 反射式光纤表面等离子体波共振传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 404~409
- 2 David Monzón-Hernández, Joel Villatoro. High-resolution refractive index sensing by means of a multiple-peak surface plasmon resonance optical fiber sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, **115**(1): 227~231
- 3 Lu Qiang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Sensitivity of surface plasma resonance sensor for different wavelengths[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 972~976  
吕强, 黄德修, 元秀华等. 不同波长下表面等离子体共振传感器的灵敏度[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 972~976
- 4 Zeng Jie, Lian Dakai, Du Yan *et al.*. Quasi-distributed optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 243~248  
曾捷, 梁大开, 杜艳等. 准分布式光纤表面等离子体波传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 243~248
- 5 K. S. Chiang, Y. Liu, M. N. Ng *et al.*. Analysis of etched long-period fiber grating and its response to external refractive index[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(11): 966~967
- 6 Yun Binfeng, Chen Na, Cui Yiping. Refractive index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1013~1015  
恽斌峰, 陈娜, 崔一平. 基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1013~1015
- 7 X. W. Shu, L. Zhang, I. Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. *Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 255~266
- 8 J. F. Ding, A. P. Zhang, L. Y. Shao *et al.*. Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index

- sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1247~1249
- 9 W. Liang, Y. Y. Huang, Y. Xu *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**: 151122
- 10 J. Yang, L. Yang, Ch. Q. Xu *et al.*. Optimization of cladding-structure-modified long-period-grating refractive-index sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 372~380
- 11 G. Sun, A. G Kirk. A highly sensitive index sensor based on attenuated total reflection inside a cavity[J]. *IEEE Lasers &*

- Electro-Optics Society*, 2006. 356~357
- 12 L. Elster, M. E. Jones, M. K. Evans *et al.*. Optical fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric (EFPI)-based biosensors [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3911**: 105~112
- 13 X. W. Wang, J. Ch. Xu, Zh. Wang *et al.*. Intrinsic Fabry-Pérot interferometer with a micrometric tip for biomedical applications [C]. in *Proceedings of the IEEE 32nd Annual Northeast on Bioengineering Conference*, 2006. 55~56

## 光学前沿——2008'全国信息光学与光子器件学术会议

### Optics Frontier——2008' China Information Optics and Photonic Devices Conference

光学前沿——2008'全国信息光学与光子器件学术会议(CIOC 2008')由中国光学学会指导,中国科学院上海光学精密机械研究所主办,是展示我国信息光学、光子器件、光电子技术研究和应用成果的平台。会议旨在推动我国信息光学与光子器件技术的发展。首届会议(CIOC 2008')由南京信息工程大学和光学期刊联合编辑部承办,将于2008年8月26~28日在南京信息工程大学举行。

会议面向全国高等院校、科研院所、光电器件相关高新技术企业征集高水平论文,投稿论文一经录用,至少需一名作者到会向大会作报告,会议将向报告人颁发报告证书。同时,被录用论文将在《光学学报》信息光学专刊发表,该专刊将于11月份出版(EI核心版全刊检索)。

本次会议将在录用的论文中评选出优秀学术论文,颁发证书和奖金。

会议地点:南京信息工程大学

主办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所

支持单位:中国光学学会

承办单位:南京信息工程大学、光学期刊联合编辑部

媒体支持:《光学学报》、《中国激光》、《激光与光电子学进展》、

*Chinese Optics Letters*、中国光学期刊网([www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net))。

组织机构:

大会共主席:王育竹(中国科学院院士,上海光机所)

吴培亨(中国科学院院士,南京大学)

李廉水(南京信息工程大学校长,教授)

节目委员会主席:刘立人(上海光机所,研究员,《光学学报》执行主编)

节目委员会副主席:任晓敏(北京邮电大学,教授,《中国激光》编委)

倪国强(北京理工大学,教授,中国光学学会秘书长)

委员:李刚 王明华 方祖捷 刘式墉 于荣金 吴重庆

周常河 余金中 徐雷 陈建平 黄惠杰 崔向群

王向朝 邱昆 何赛灵 袁小聪 王鸣 孙小茜

闵锦忠 瞿荣辉 徐安士 钱景仁 黄德修 谢世钟

曾和平 陈卫标 李传起

大会秘书处:

秘书长:李传起 杨蕾

秘书:段家喜 童菲 陈艳 李纯成

会议主要邀请报告:

姚建铨 院士 题目待定

吴重庆 教授 半导体光放大器的非线性偏振旋转及应用

于荣金 教授 题目待定

黄德修 教授 题目待定

刘式墉 教授 题目待定

余金中 研究员 从硅电子学到硅光子学

谢世钟 教授 基于双波长光纤激光器的光生毫米波技术

王明华 教授 集成光学研究的新进展

徐雷 教授 High efficiency Yb fiber laser prepared with sol-gel DC-RTA technique

曾和平 教授 掺Yb陶瓷飞秒激光及其放大

陈卫标 研究员 题目待定

方祖捷 研究员 题目待定

王向朝 研究员 高端光刻机投影物镜像质原位检测技术的研究

袁小聪 教授 题目待定

王鸣 教授 基于光纤的激光自混合干涉理论及应用研究

李传起 教授 OCDMA 网络系统关键技术的研究

会议主题/征稿范围:

1. 光信号处理技术

2. 光源与光放大器

3. 光通信网络组网技术

4. 光无源器件与集成光路

5. 光电子技术及其应用

7. 其他相关技术

6. 先进光功能材料技术及应用

重要日期:

预注册截止时间:2008年7月15日

论文摘要截止时间:2008年7月25日

(摘要要求使用5号字,1000字左右,可以使用图表,但全文内容必须控制在1个A4页面以内)

论文全文截止时间:2008年8月20日

日程安排:

报 到:8月26日全天

大会报告:8月27日9:00~17:00

分会场报告:8月28日9:00~17:00

优秀论文颁奖仪式:8月28日17:00~18:00

考 察:8月29日

注册报到事项:

1. 会址:南京信息工程大学(南京市浦口区宁六路219号)

2. 收费:本次会议收取会务费800元,学生凭学生证600元

3. 住宿:南京信息工程大学东苑宾馆

4. 说明:对于提交论文但不能参加论坛的作者,秘书处不负责向《光学学报》推荐其论文。

5. 联系方式:

电话:021-69918426(段老师) 025-58731017(李老师)

E-mail: [icc@nuist.edu.cn](mailto:icc@nuist.edu.cn)。

6. 会议网站: <http://web.nuist.edu.cn/slxy/cioc>

<http://www.opticsjournal.net/meeting>