

文章编号: 0253-2239(2007)04-0690-5

# 减少聚合物阵列波导光栅损耗的蒸气回溶技术\*

张海明<sup>1</sup> 马春生<sup>1</sup> 秦政坤<sup>1,2</sup> 张希珍<sup>1</sup> 张 丹<sup>1</sup> 刘式墉<sup>1</sup> 张大明

1 吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室, 电子科学与工程学院, 长春 130012  
2 吉林师范大学, 四平 136000  
3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130021

**摘要:** 阵列波导光栅(AWG)器件是波分复用(WDM)系统的一种关键器件,其中,聚合物阵列波导光栅由于其制备工艺、器件集成等方面的优势而受到人们的日益关注。侧壁散射损耗是聚合物阵列波导光栅损耗的一个主要因素,减少阵列波导光栅波导的侧壁损耗对制备低损耗阵列波导光栅具有重要意义。一种蒸气回溶技术被用来有效地减少硅基聚合物阵列波导光栅的散射损耗,该技术的机理是饱和溶剂分子融入并软化波导侧壁,增加其流动性,从而降低波导侧壁粗糙度。用扫描电镜方法验证了用该技术能获得更光滑的波导侧壁。对直波导和阵列波导光栅样品进行回溶处理,测试后得到直波导的侧壁散射损耗减少 2.1 dB/cm,阵列波导光栅中心信道和周边信道的插入损耗分别减少 5.5 dB 和 6.7 dB,串扰减少 2.5 dB。

**关键词:** 平面光波回路; 阵列波导光栅; 蒸气回溶; 插入损耗; 串扰

中图分类号: TN256 文献标识码: A

## Steam-Redissolution Technique for Reduction of Polymer/Si Arrayed Waveguide Grating Loss

Zhang Haiming<sup>1</sup> Ma Chunsheng<sup>1</sup> Qin Zhengkun<sup>1,2</sup> Zhang Xizhen<sup>1</sup> Zhang Dan<sup>1</sup>  
Liu Shiyong<sup>1</sup> Zhang Daming<sup>1,3</sup>

1 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012  
2 Jilin Normal University, Siping 136000  
3 State Key Laboratory on Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021

**Abstract:** Arrayed waveguide grating (AWG) is a key device in wavelength-division multiplexing (WDM) system. Polymer arrayed waveguide grating has recently attracted much attention due to its easier fabrication and higher-density device integration. Sidewall roughness scattering is one of the main loss factors for polymer arrayed waveguide grating. Reduction of sidewall scattering loss plays an important role in fabricatiton of low-loss polymer arrayed waveguide grating. An efficient steam-redissolution technique is used to greatly reduce sidewall scattering loss in the polymer/Si arrayed waveguide grating. The mechanism of this technique is that saturated solvent molecules adsorb and get into sidewalls of waveguides and enhance their fluidity, and then reduce roughness of sidewalls. Smoother sidewalls are achieved and verified by a scanning electron microscopy. Both straight waveguides and arrayed waveguide grating devices are steam-redissolved and reduction of their sidewall scattering loss is further measured. The sidewall loss in straight polymer waveguide is decreased by 2.1 dB/cm, the insertion loss of an arrayed waveguide grating device is reduced by about 5.5 dB for the central channel and 6.7 dB for the edge channels, and the crosstalk is reduced by 2.5 dB after the steam-redissolution.

**Key words:** plane lightwave circuit; arrayed waveguide grating; steam redissolution; insertion loss; corsstalk

\* 国家自然科学基金(60576045, 60507004)和新世纪优秀人才支持计划资助课题。

作者简介: 张海明(1980—),男,浙江温岭人,博士研究生,主要从事光电子学和导波光学方面的研究。

E-mail: zhanghaimingjl@yahoo.com.cn

导师简介: 张大明(1970—),男,吉林东丰人,教授,博士生导师,主要从事有机光电子学和导波光学等方面的研究。

E-mail: zhangdmin@263.net

收稿日期: 2006-01-04; 收到修改稿日期: 2006-06-01

## 1 引言

波分复用(WDM)技术是解决当前网络大容量信息传输需要的一种有效方法,它拓宽了单根光纤的信息容量,为新型网络的构建提供了可行性。阵列波导光栅(AWG)是阵列波导光栅系统的一种关键器件,它可以作为复用器、解复用器、波长路由器等,此外,阵列波导光栅也可用于构建平面光波回路(PLC),用途非常广泛<sup>[1~5]</sup>。众所周知,阵列波导光栅的损耗来自于材料吸收损耗、衬底泄漏损耗、侧壁散射损耗、耦合损耗和弯曲损耗。以前的研究表明,除了材料的吸收损耗,阵列波导光栅的损耗主要来自于侧壁粗糙或者不完整,因为粗糙的侧壁使光在传输过程中以辐射模的形式损失掉<sup>[6]</sup>。这种损耗机制大大影响了阵列波导光栅的性能,为解决这一问题,Armani 等<sup>[7]</sup>提出了用激光退火的方法降低侧壁的粗糙度。

在最近的 15 年中,许多研究团体提出并制作出了聚合物阵列波导光栅,因为它具有许多特有的优点,比如:成本低、制作简单、折射率容易控制等<sup>[8~10]</sup>。研究表明,波导侧壁散射损耗也是聚合物阵列波导光栅损耗的一个主要因素。基于这种考虑,Yen 等<sup>[11]</sup>提出了用热回流(thermal-reflow)技术减少聚合物波导的侧壁粗糙,并验证了该技术对减少波导损耗的有效性。本文报道了用蒸气回溶技术来减少波导侧壁的粗糙和波导损耗,并进一步用实验数据说明了把该技术应用于阵列波导光栅的制备,使其插入损耗和串扰分别提高了 5.5~6.7 dB 和 2.5 dB。

## 2 试验和测试

阵列波导光栅器件是用铝掩膜结合反应离子刻蚀(RIE)技术的方法来加以制备<sup>[12]</sup>。这种方法可应用于刻蚀许多制备波导器件的聚合物材料,比如丙烯酸聚合物、聚酰亚胺、聚苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯等。在这篇文章中,全氟苯乙烯与甲基丙烯酸环氧丙酯(PFS-co-GMA)的共聚物被用作聚合物波导材料,它的分子式如图 1 所示,玻璃化温度为 102~108 °C。苯乙烯(St)用来调节 PFS-co-GMA 形成更高折射率的芯层材料,所以该材料的折射率范围可以在 1.46~1.55 之间可调,包层和芯层折射率差  $\Delta=0.5\%$ 。通过旋涂、光刻和反应离子刻蚀来制备掩埋式的波导,制作示意图如图 2 所示,包括图 2(a)依次旋涂并烘烤下包层和芯层,图 2(b)光刻,图 2(c)反应离子刻蚀,图 2(d)蒸气回溶,图 2(e)旋涂并烘烤上包层。反复的实验证明,波导的侧壁损耗主

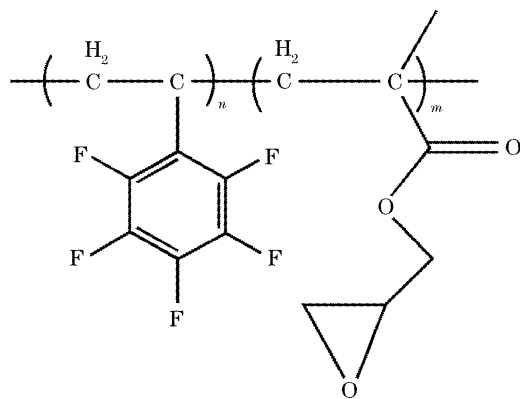


图 1 聚合物 PFS-co-GMA 的分子式

Fig. 1 Molecular formula of the PFS-co-GMA

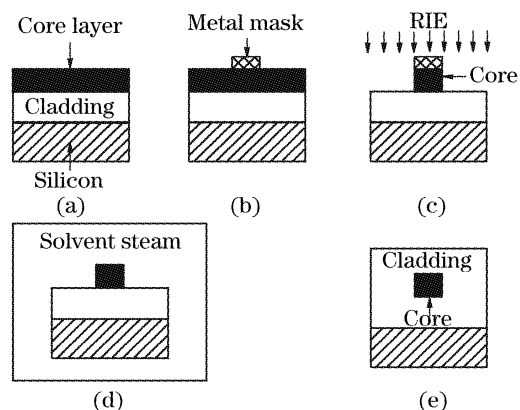


图 2 制备阵列波导光栅的工艺流程图

Fig. 2 Fabrication procedures of array waveguide grating 要来自于四个方面:光刻的不均匀、铝掩膜的不致密、显影的不彻底和反应离子刻蚀过程中的侧向刻蚀。蒸气回溶处理在反应离子刻蚀形成波导芯之后,样品被放置在饱和溶剂蒸气中,在不同的温度和时间下,进行回溶实验。蒸气回溶的机理是:在饱和和蒸气压的作用下,溶剂分子吸附并溶入到波导粗糙的侧壁中,增加了波导侧壁的流动性,侧壁表面张力平滑侧壁的皱状起伏与毛刺,从而达到光滑波导侧壁的目的。四氢呋喃(THF)被用来作为蒸气回溶实验的溶剂。为了控制蒸气回溶时间,使波导形状不发生明显的变化,蒸气的温度设定在 50~60 °C,低于四氢呋喃的沸点 7~17 °C(四氢呋喃的沸点为 67 °C)。为了更好的比较,两个一样的阵列波导光栅图形集成在一块模版上,这样一次性的可以制备出两个波导侧壁粗糙度一致的阵列波导光栅器件。然后将这两个样品用不同的温度的蒸气在不同的时间条件下,进行回溶处理。图 3 中,扫描电镜(SEM)照片显示了蒸气回溶处理对波导侧壁有非常明显的光滑作用。图 3(a)是没有进行回溶处理的阵列波导光栅波导照片,图 3(b)是在 55 °C 的溶剂蒸气中回溶 25 min 的阵列波导光栅波导照片,图 3(c)和图

3(d)是在 55 °C 的溶剂蒸气中回溶 35 min 的阵列波导光栅波导照片。在实验温度范围 15~65 °C 内,越高的蒸气温度和越长的回溶时间,就会获得越光滑的波导侧壁。图 3(b)和图 3(c)显示,回溶处理也会使波导形状发生变化,不同的波导形状可以通过不同的回溶条件来的到。原始的波导形状是正方形的  $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$ ,回溶圆滑了波导横截面的两上边角,并且增加波导下边的宽度,如图 3(d)所示。这种变

形会轻微的改变波导芯的有效折射率,从而影响阵列波导光栅的波长、自由光谱区和带宽<sup>[13]</sup>。然而,这种波导形状的变化是轻微的,对阵列波导光栅的性能没有很大影响,只要在版图设计的过程中,通过适当加宽波导的宽度就可以修正。另一方面,如果回溶的温度和时间过长,会使波导形状由方形变成三角形,所以回溶的温度和时间应该适当的选择,避免波导形状的严重变形。

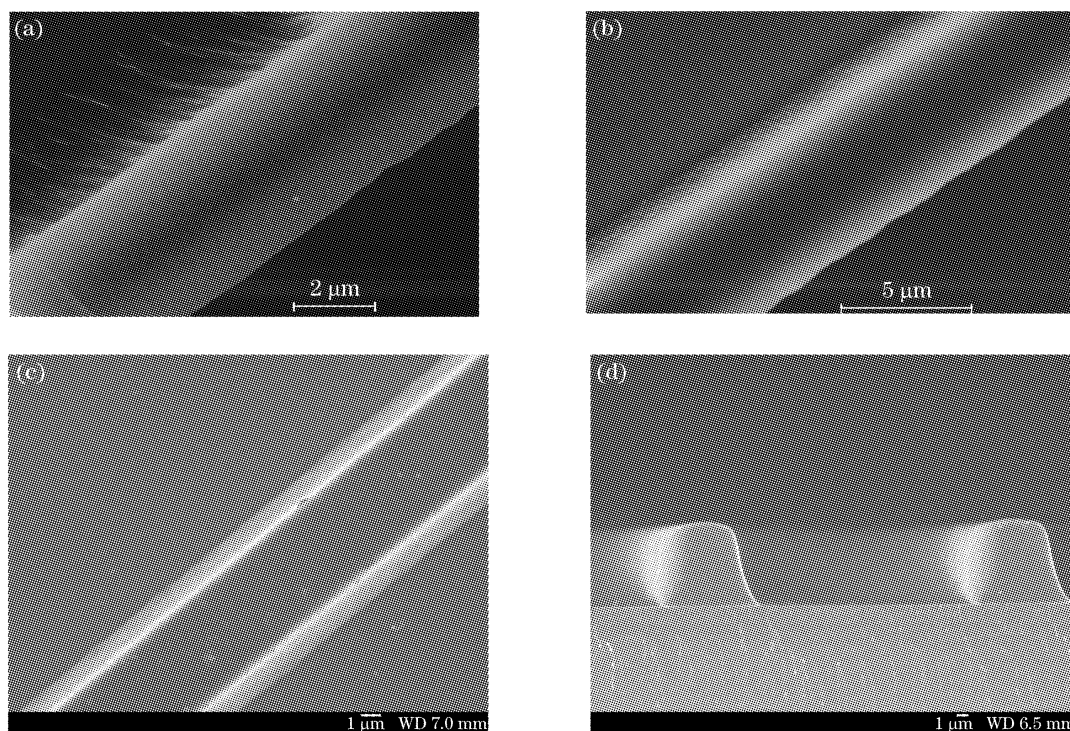


图 3 阵列波导光栅波导侧壁的扫描电镜照片。(a)回溶前,(b) 55 °C 回溶 25 min,(c) 55 °C 回溶 35 min。(c) 相应的波导横截面扫描电镜照片如(d)所示

Fig. 3 SEM pictures showing the sidewall of arrayed waveguide grating waveguides before redissolution (a), after redissolution at 55 °C for 25 min (b), and after redissolution at 55 °C for 35 min (c). The corresponding cross-sectional SEM pictures are of figure (c) shown in (d)

为了进一步验证蒸气回溶对减少波导侧壁散射损耗的有效性,规格尺寸一样的  $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$  的直波导被用来在不同的条件下进行蒸气回溶处理,用截断法测得的波导损耗指数与回溶温度的关系如图 4 所示。从图 4 可以看出,波导损耗与回溶的温度和时间有非常大的关系,在 55 °C 的蒸气环境中,回溶 35 min,直波导的传输损耗降低了 2.1 dB/cm,对于直波导而言,传输损耗只包括材料吸收损耗、衬底泄漏损耗和侧壁散射损耗。其中材料吸收损耗和衬底泄漏损耗在回溶前后保持不变。在实验中,为了把泄漏损耗降到尽量的小( $<0.01\ \text{dB}$ ),下包层旋涂并烘烤两次,其厚度达到  $12\ \mu\text{m}$ 。所以,直波导传输损耗的变化主要是波导侧壁散射损耗的变化,即 2.1 dB/cm。图 4 清楚地表明,波导损耗在一个临界

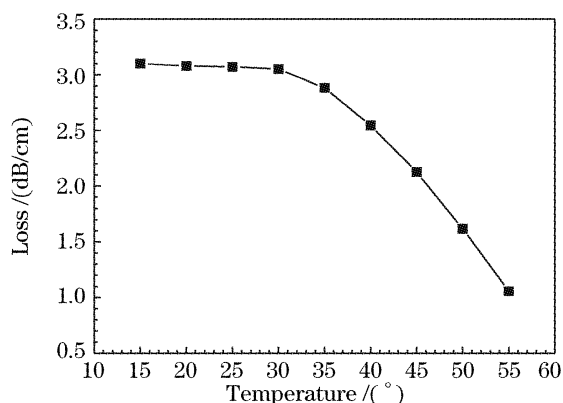


图 4 在相同的回溶时间下,蒸气温度对波导传输损耗的影响,说明蒸气回溶技术对减少波导损耗的有效性  
Fig. 4 Propagation losses depending on the steam temperature for the same durations, indicating the effectiveness of SRD technique in reducing the waveguide loss

回溶时间上快速的减少。这个结果说明了蒸气回溶技术能够有效地减少波导侧壁的散射损耗。

本文进一步的测量和讨论了阵列波导光栅器件在回溶前和在 55 °C 回溶 35 min 后的传输光谱。阵列波导光栅器件由 33 条输入/输出(I/O)信道、201 条阵列波导、两个平板波导组成,器件尺寸 3.2 cm × 1.9 cm。该阵列波导光栅的优化参量值如表 1 所示。

图 5 显示了回溶前后阵列波导光栅插入损耗和串扰的变化。图 5(a)显示了在 55 °C 回溶 35 min 后,阵列波导光栅的串扰小于 -22.5 dB,中心信道和周边信道的插入损耗分别为 8.5 dB 和 10.8 dB。图 5 (b)显示了未进行回溶处理的阵列波导光栅的插入损耗和串扰分别为 14.0~17.5 dB 和 -20 dB。这说明了回溶技术能明显的减少阵列波导光栅器件的插入损耗和串扰,分别减少 5.5~6.7 dB 和 -2.5 dB。

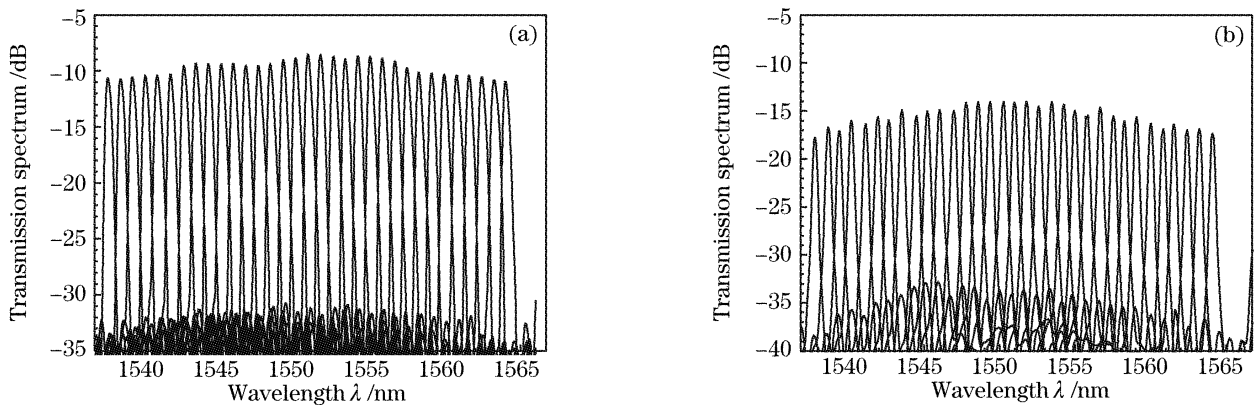


图 5 所测得的聚合物阵列波导光栅的传输光谱。(a) 55 °C 回溶 35 min, (b) 未进行蒸气回溶处理

Fig. 5 Measured spectra of polymer arrayed waveguide grating (a) with 55 redissolution for 35 min, and (b) without SRD treatment

### 3 结 论

蒸气回溶技术能够明显光滑聚合物波导的侧壁和减少波导侧壁散射损耗,进而减少阵列波导光栅器件的插入损耗和降低串扰。这些可以通过波导的扫描电镜照片和波导损耗的变化来加以说明。具体的,对阵列波导光栅样品进行回溶处理,插入损耗和串扰分别减少 5.5~6.7 dB 和 2.5 dB。原则上,蒸气回溶技术可以适用于其他聚合物波导器件的研制。下一步的研究工作是进一步改进蒸气回溶技术,使之更好的减少侧壁散射损耗,研制出性能更加优良的聚合物阵列波导光栅器件。

### 参 考 文 献

1 Lu Ping, Liu Deming, Cao Qian *et al.*. Theoretical analysis of arrayed waveguide grating as a linear system and its optimal structure design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 804~808

Parameter	Value
Central wavelength $\lambda_0 / \mu\text{m}$	1550.918
Wavelength spacing $\Delta\lambda / \text{nm}$	0.8
Refractive index of polymer core $n_1$	1.4704
Refractive index of polymer cladding $n_2$	1.463
Core width $a / \mu\text{m}$	5
Core thickness $b / \mu\text{m}$	5
Pitch of adjacent waveguides $d / \mu\text{m}$	15.5
Diffraction order $m$	56
Focal length of slab $f / \mu\text{m}$	7838.22
Length difference of adjacent arrayed waveguides $\Delta L / \mu\text{m}$	59.29
Free spectral range FSR / nm	27.58
Number of I/O channels $2N+1$	33
Number of arrayed waveguides $2M+1$	201

(in Chinese)

鲁平,刘德明,曹倩等. 阵列波导光栅线性系统理论分析及优化设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 804~808

2 Zhu Daqing, Xu Zhen'e. Temperature-insensitive arrayed waveguide grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 907~911 (in Chinese)

朱大庆,许振鄂. 一种温度不敏感型阵列波导光栅的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 907~911

3 Liu Qing, Ma Weidong, Wang Wenmin *et al.*. The research of coarse wavelength division multiplexer based on arrayed waveguide grating with broadened pass-band and low crosstalk[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1265~1268 (in Chinese)

刘青,马卫东,王文敏等. 一种通带平坦的粗波分复用/解复用器件的研制[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1265~1268

4 Junming An, Jian Li, Dingshan Gao *et al.*. Design and numerical analysis for low birefringence silica on silicon waveguides[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8): 456~458

5 Fei Wang, Wei Sun, Aize Li *et al.*. Polymeric 32-channel arrayed waveguide grating multiplexer using fluorinated poly (ether ether ketone)[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 568~570

6 V. Van, P. P. Absil, J. V. Hryniewicz *et al.*. Propagation loss in single-mode GaAs-AlGaAs microring resonators: Measurement and model[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(11): 1734~1739

- 7 D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane *et al.*. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip[J]. *Nature*, 2003, **421**: 925~928
- 8 A. Yeniay, R. Y. Gao, K. Takayama *et al.*. Ultra-low-loss polymer waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 154~158
- 9 S. Toyoda, N. Ooba, A. Kaneko *et al.*. Wideband polymer thero-optic wavelength tunable filter with fast response for WDM systems[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**: 658~660
- 10 N. Keil, H. H. Yao, C. A. Zawadzki. Athermal all-polymer arrayed-waveguide grating multiplexer [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(9): 579~580
- 11 C. Y. Yen, L. J. Guo. Thermal-flow technique for reducing surface roughness and controlling gap size in polymer microring resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(14): 2479~2481
- 12 F. Wang, C. S. Ma, W. Sun *et al.*. Arrayed waveguide grating multiplexer with high thermal stability on silicon[J]. *Optics & Laser Technol.*, 2005, **37**: 527~531
- 13 C. S. Ma, H. M. Zhang, D. M. Zhang *et al.*. Effects of trapezoid core cross-section on transmission characteristics of polymer arrayed waveguide grating multiplexers [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**: 321~331



## LASER2007' Harbin

### 第十八届全国激光学术会议第一轮通知

中国光学学会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十八届全国激光学术会议,定于2007年8月在黑龙江哈尔滨举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、新概念、新技术的交流平台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名院士和著名专家到会作大会报告,各分会设立高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。同时欢迎各公司、企事业单位刊登广告、到会展示科技成果产品和发布信息。

会议时间:2007年8月,会期4天

会议地点:中国·黑龙江·哈尔滨

主办单位:中国光学学会、中国电子学会

承办单位:哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室

名誉主席:周炳琨院士

会议主席:范滇元院士、周寿桓院士

会议副主席:姚建铨、彭堃堦、朱健强、王 骐、王树国

秘书长:陈德应

会议主题/征稿范围:1) 激光物理(激光器动力学、激光等离子体物理、X光激光、激光光谱等);2) 非线性光学与量子光学;3) 全固态激光器及新型激光器;4) 激光信息及处理技术;5) 激光生物与激光医学;6) 工业激光及其应用;7) 激光材料、薄膜及元器件;8) 光束传输、控制及光束特性

征文要求:将500~800字摘要(用于审稿)和300字提要(用于出版)各一份,以电子邮件附件的形式发送至:Laser2007@hit.edu.cn,摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括研究目的、方法结果、结论等内容。不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文,提交截稿日期为2007年5月31日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail等)、关键词3~6个。题目用小三号黑体,摘要用宋体小四号字按word格式编排,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮寄件。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。

会议秘书组联系人及联系电话:

陈德应 0451-86402837,何伟明 0451-86412710-214,

程元丽 0451-86402920,王春晖 0451-86402910,王瑞环 0451-86413164

传真:0451-86413164,E-mail:Laser2007@hit.edu.cn,网页:www.Laser2007.hit.edu.cn

地址:黑龙江哈尔滨南岗区一匡街2号哈工大科学园3031信箱(王瑞环收),邮编:150001

中国光学学会激光专业委员会

中国电子学会量子电子学与光电子学分会

哈尔滨工业大学

可调谐激光技术国家级重点实验室

哈尔滨工业大学光电子技术研究所

2007年1月22日