

文章编号: 0258-7025(2007)06-0765-06

激光直写法制备条形光波导中的功率密度阈值

刘家骏, 王泽敏, 李爱魁, 胡乾午, 曾晓雁

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用溶胶-凝胶法(sol-gel)在 Si 基 SiO₂ 衬底上制备了 SiO₂-TiO₂ 芯层薄膜, 构成了以 SiO₂ 为下包层, 空气为上包层的平面光波导。利用光纤激光器对平面波导的芯层进行直写, 结合后续的化学腐蚀工艺得到了 SiO₂-TiO₂ 条形光波导, 并着重研究了激光直写波导过程中存在的功率密度阈值以及阈值随薄膜预热处理温度的变化关系。研究表明, 激光直写 SiO₂-TiO₂ 波导存在起始收缩阈值和烧蚀损伤阈值; 随着薄膜热处理温度的提高, 两个阈值同时增大, 其中损伤阈值的增大趋势要大于收缩阈值; 因而薄膜可承受的直写光斑直径变小, 所得波导宽度显著减小。最后对直写制得条形光波导的导光性能作了测试分析, 验证了波导的三维导光性。

关键词 激光技术; 条形光波导; 激光直写; 溶胶-凝胶法; 激光功率密度阈值

中图分类号 TN 252; TN 205 **文献标识码** A

Thresholds of Laser Power Density in Fabricating Strip Optical Waveguides by Laser Direct Writing Method

LIU Jia-jun, WANG Ze-min, LI Ai-kui, HU Qian-wu, ZENG Xiao-yan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics,

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract SiO₂-TiO₂ planar waveguides on Si/SiO₂ substrate were prepared by sol-gel method. A fiber laser was used to fabricate strip optical waveguides in the core layer of the planar waveguides by laser direct writing of the sol-gel coatings. The thresholds of laser power density for laser direct writing optical waveguides on the SiO₂-TiO₂ planar waveguides were studied systematically. Moreover, the relationships between the thresholds of laser power density and anneal temperature on sol-gel films were also discussed. The experimental results show that there are initial shrinkage threshold and damage threshold when laser direct writing strip optical waveguides on the SiO₂-TiO₂ coatings are fabricated by sol-gel technique. Both the two thresholds mentioned above increase with the anneal temperature on films respectively, but the increasing trend of the damage threshold is more prominent than that of the shrinkage threshold, which indicates a much smaller laser spot allowed in laser direct writing. Therefore, narrower strip optical waveguides in width can be fabricated in this situation. At last, the light propagation character of the strip waveguides was measured, the three-dimensional light propagation mode of the strip waveguides was confirmed.

Key words laser technique; strip waveguide; laser direct writing; sol-gel; laser power density threshold

1 引言

激光直写技术无需传统光刻工艺繁琐的掩模曝光环节, 利用激光加工设备的 CAD/CAM 功能, 就可以完成复杂形状光电子产品的制造, 因此具有制

造工艺简便快捷、柔性化等优势, 在制造光电子器件方面正受到越来越多的关注^[1,2]。

激光直写溶胶-凝胶(sol-gel)芯层薄膜制备 SiO₂-TiO₂ 条形光波导的研究始于 20 世纪 90 年代^[3~10]。它是在三维数控工作台上使用激光束对

收稿日期: 2006-11-24; 收到修改稿日期: 2007-01-15

基金项目: 国家“863”计划(2005AA311030)和国家自然科学基金(50575086)资助项目。

作者简介: 刘家骏(1981—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为激光微制造光电子器件。E-mail: jiajun-liu@163.com

导师简介: 曾晓雁(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为激光先进制造技术与装备。

E-mail: xyzeng@mail.hust.edu.cn (通信作者)

溶胶-凝胶薄膜直写,利用激光束斑与膜层相互作用时产生的热效应,在薄膜上固化出光波导的图案,然后通过化学方法去除激光未作用区得到条形光波导,整个直写过程中无需光敏物质参与。可用于激光直写的激光器种类很多,根据工艺特点不同主要包括 Nd:YAG 固体激光器,CO₂ 气体激光器,Ar 离子激光器等。在以往国内外的同类报道中,对于直写工艺和光波导传输损耗方面都进行过相关研究,验证了激光直写方法制备条形光波导的可行性。但是,激光直写所制备的波导宽度一般在 150~200 μm 甚至更宽,阻碍了该技术在集成光学中的应用。因此,激光直写溶胶-凝胶薄膜制备条形光波导的技术关键不仅需要进一步降低波导的传输损耗,减小成型光波导的线宽也是至关重要的。

激光直写所得光波导的外观尺寸与质量,不仅与所采用激光束的波长和光束质量有关,还与薄膜、衬底材料和激光工艺参数有直接的关系。本实验采用波长为 1.07 μm 的连续波输出光纤激光器,对 Si 基 SiO₂ 衬底上的 SiO₂-TiO₂ 溶胶-凝胶薄膜进行直写。详细讨论了直写过程中存在的激光功率密度阈值,分析了阈值与薄膜预处理温度的关系,并提出了一条减小波导线宽的有效途径,最后对条形波导的通光性能作了分析。

2 实验方法和设备

以 Si/Ti 物质的量比为 1:1 的溶胶为成膜材料,采用提拉成膜法^[11](TL 0.01 型垂直提拉机)在表面氧化有 8 μm SiO₂ 层的单晶硅衬底上制备了 SiO₂-TiO₂ 薄膜。激光直写前将样品置于电阻炉中,在不同温度下分别保温 30 min 进行热处理,以研究热处理温度对激光直写阈值的影响规律。

激光直写过程在自行研制的激光微加工平台上完成^[12]。选用波长为 1.07 μm 连续波光纤激光器作为直写的能量源,光束模式为 TEM₀₀,激光器的功率在 0~50 W 内连续可调;直写速度、图案可由控制系统设定和调节;直写光斑直径由离焦量来控制。直写完成后,把样品浸入 HF 稀释缓冲腐蚀液进行化学腐蚀,去除激光未作用区域,然后用大量去离子水清洗和氮气吹干,获得最终的条形光波导。整个薄膜的制备和直写波导的过程均在千级超净室内完成。

采用 Metricon 2010 棱镜耦合仪测定薄膜的厚度和折射率;通过 Nikon Epiphot 300 光学显微镜来观察薄膜和波导的表面形貌;激光作用后薄膜的收

缩量 and 条形波导的横截面轮廓采用 DEKTAK II A 探针轮廓仪进行测量;芯层薄膜平面波导以及激光直写得到条形波导的通光测试在多通道光纤/波导耦合系统上完成。

3 实验结果及讨论

研究中采用波长为 1.07 μm 的激光以匀速线扫描的方式辐照 SiO₂-TiO₂ 薄膜,在薄膜上获得收缩致密化线条,然后化学腐蚀成型后得到最后的条形光波导。由于 SiO₂-TiO₂ 薄膜对波长为 1.07 μm 的激光吸收十分微弱,条形波导固化成型所需的能量由 Si 衬底所吸收的激光能量经热传导转化而来。经过大量实验发现对直写效果的影响主要是激光功率和光斑直径,而不同扫描速度的影响是微弱的,下面结果均是采用 1 mm/s 的扫描速度直写得到的,以功率密度 ($F = 4P/\pi D^2$, P 为激光功率, D 为光斑直径) 来表征直写阈值。

3.1 激光直写波导芯层薄膜阈值

激光直写过程中,当作用激光功率密度很小时, SiO₂-TiO₂ 薄膜表面不会出现收缩固化现象。只有激光功率密度升高到一定值时,薄膜才出现厚度方向的收缩,同时出现固化线条,将此时的功率密度值称为激光直写的起始收缩阈值 (F_s);随着作用功率密度的继续升高,薄膜的收缩率变大,线条的轮廓越来越明显,当功率密度达到某一较大值时,薄膜开始被烧蚀而出现损伤,将该功率密度值定义为激光直写的烧蚀损伤阈值 (F_d)。要获得良好成型而不出现损伤的波导线条,激光直写的功率密度 F 必须满足 $F_s < F < F_d$ 的条件。两个阈值的差值 ΔF ($\Delta F = F_d - F_s$) 为激光直写波导薄膜的收缩功率密度范围,在 ΔF 范围内,薄膜的收缩率随激光功率密度增加而增大。

对于经过一定温度预热处理的薄膜,由于其内部成分和结构是一定的,所以激光直写的收缩功率密度阈值 (F_s) 和损伤功率密度阈值 (F_d) 都是定值。图 1 为经过 200 °C 热处理的薄膜在不同功率密度下激光直写的照片和收缩情况。

图 1(a) 为激光直写功率密度在起始收缩阈值附近时的作用效果,此时薄膜刚开始出现可观察的固化线条,但整体形貌比较模糊,截面轮廓也只反应出不足 3% 的收缩率。图 1(c) 为直写功率密度在损伤阈值附近时的作用效果,可以发现该条件下激光作用区薄膜出现了烧蚀损伤,尤其是在线条的中心

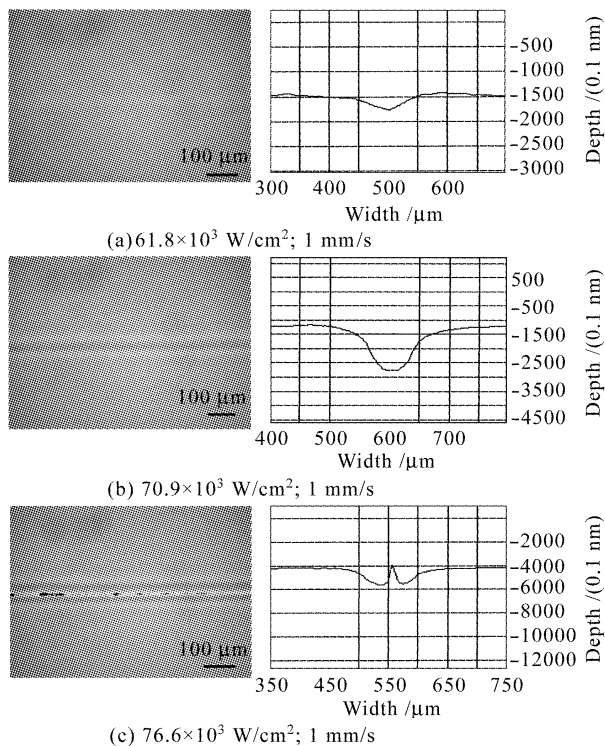


图 1 不同功率密度下激光直写获得的线条(未经腐蚀)及其横截面轮廓图

Fig. 1 Photographs of strips got by laser direct writing (before chemical etching) and their corresponding transverse profiles at different laser power density

更为明显,由截面轮廓可知收缩线条中心出现了隆起现象,所以不能计算薄膜的收缩率。相关文献认为这种隆起是由于激光作用能量过高致使衬底材料熔融气化造成的^[3]。当激光功率密度值介于上述两阈值之间并且靠近损伤阈值时,所获得的直写效果最佳,收缩线条清晰均匀,相应于光束的高斯能量分布,薄膜截面轮廓呈现出均匀对称的倒高斯曲线形的凹陷,如图 1(b)所示,此时薄膜的收缩率在 30% 左右。

3.2 光斑直径对激光直写的影响

在实际的直写过程中,激光的能量输出是以功率的形式来调节的。对于经过一定温度热处理后的 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 薄膜,激光直写的功率密度范围 ΔF 是定值,直写功率可调节范围 $\Delta P = \Delta F \times \pi(D/2)^2$,所以直写功率调节范围(ΔP)与光斑直径的大小密切相关。实验中,为了获得宽度窄的波导线条,减小激光束光斑直径是非常有效的手段,但随着直写光斑直径的变小, ΔP 的值也随之减小,当 ΔP 小到超出了激光器的功率控制精度范围时,就无法调节功率使得直写功率密度满足 $F_s < F < F_d$,直写效果上表现为薄膜只存在损伤,而没有收缩固化的波导线条。

本实验条件下发现,在焦点光斑下直写 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 预热处理后的薄膜时就无法获得良好的固化条形波导,只存在如图 2 所示的损伤线条。经计算,此时的激光直写收缩功率范围 ΔP 为 $3.1 \times 10^{-5}\text{ W}$,这样小的功率变化已经远超出了本实验条件下光纤激光器所能够调控的范围,因此无法制备出高质量的条形光波导。

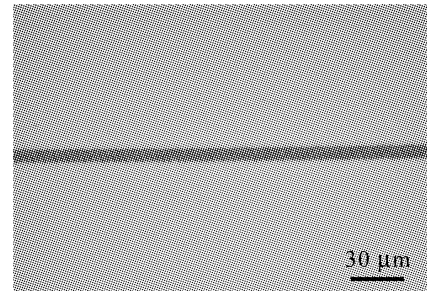


图 2 激光直写光斑直径小于临界光斑直径时的烧蚀损伤线条

Fig. 2 Photo of damage strip by laser direct writing with a laser spot smaller than the critical area

可见,激光直写波导时光斑直径存在着一个临界值,定义为临界光斑直径(D_c)。当光斑直径小于 D_c 时,激光直写薄膜时表现为没有收缩线条或者对薄膜损伤破坏(如图 2 所示);当光斑直径大于或等于 D_c 时,激光直写所需的功率范围能满足实验操作的要求,而且随着光斑直径的增大这个范围也变大。但是,由于光斑直径变大,激光作用后的收缩线条宽度也随之增大。因此,靠近临界光斑直径进行激光直写可以制备良好固化且宽度最窄的波导线条。

3.3 薄膜热处理温度对激光直写阈值和波导线宽的影响

3.3.1 薄膜热处理温度对激光直写阈值的影响

为了研究 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 溶胶-凝胶薄膜热处理温度与直写阈值的关系,制备了不同预热处理温度的薄膜。由于热处理温度低于 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时不足以排除薄膜中的有机成分;而高于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 则可能引起 TiO_2 析晶,这两者都不利于波导的光学性能。所以实验中分别在 $200\text{ }^\circ\text{C}$, $300\text{ }^\circ\text{C}$, $400\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 下对薄膜进行了热处理,然后对其进行激光直写,并找出各自的直写阈值。激光直写阈值和薄膜热处理温度的关系见图 3。

从图 3 中可以发现,薄膜的激光直写收缩阈值和损伤阈值都随着薄膜热处理温度的升高而逐渐增大。这是因为热处理温度越高,薄膜的有机成分排除越充分,致密度越高,抗损伤能力提高,从而增大

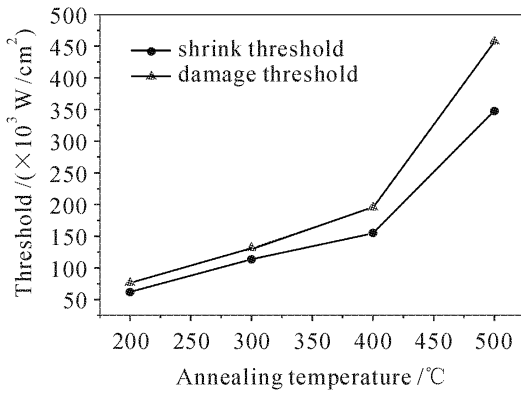


图3 激光直写阈值与薄膜热处理温度的关系曲线
Fig. 3 Laser power density thresholds versus the film anneal temperature

了激光直写的阈值。从曲线中还可以发现损伤阈值随温度的增大趋势要大于收缩阈值,这意味着 $\Delta F(\Delta F = F_d - F_s)$ 也在增大,因此随着热处理温度的提高,激光直写波导所能选择的功率密度范围有所增大,这将更有利于优化直写工艺参数。

3.3.2 薄膜热处理温度对波导线宽的影响

因为激光直写收缩功率密度范围 ΔF 随薄膜热处理温度的提高而增大,又因为 $\Delta P = \Delta F \times \pi(D/2)^2$,可知当薄膜热处理温度提高时,在保证 ΔP 可调节的情况下,可以使直写光斑直径变小。图4给出了直写波导平均线宽和薄膜的临界光斑直径(D_c)随薄膜热处理温度的变化趋势。

表1 优化的激光直写工艺参数

Table 1 Optimized parameters of laser direct writing

Anneal temperature / °C	Laser power / W	Spot diameter / μm	Scanning speed / (mm/s)	Waveguide width / μm
200	22.5~25	208	1	110
300	19.5~21.5	146	1	70
400	21~23.5	125	1	50
500	22~24.5	83	1	30

3.4 激光直写成型波导的典型形貌和通光性能

在薄膜表面经激光直写再经过化学腐蚀工艺就得到了成型的条形波导。图5给出了500 °C下热处理的薄膜经过直写和腐蚀后得到的条形波导的形貌及横截面轮廓,这也是直写获得的 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 条形波导的典型形貌。

从图5中可以看出成型后的条形波导与衬底区域对比度明显,整条波导清晰均匀,边缘整齐,宽度变化很小,而且准直性很好;其截面轮廓线平滑对称,基本上呈弧形,整个波导的底部宽度不到30 μm ,高度在350 nm以上。与前期同类工艺所得

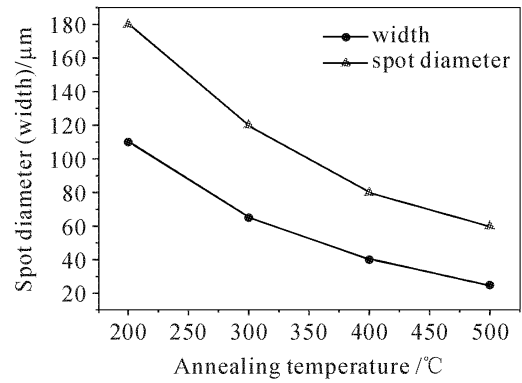


图4 临界光斑直径和直写线宽与薄膜热处理温度的关系曲线
Fig. 4 Critical spot diameter and the width of the strip waveguides versus the film anneal temperature

从图4中可以看出临界光斑直径(D_c)和直写线宽都随薄膜热处理温度升高而减小。这是因为热处理温度升高,直写的功率密度范围(ΔF)变大,在较小的激光光斑下也能实现无伤的直写固化,所得的直写线条的宽度相应会减小。从图4中两条曲线的对比可知,实际获得的收缩线条的宽度要小于直写光斑直径,这是因为光斑的能量分布并非是高斯形造成的。

结合上述激光直写阈值与波导线宽的研究得到了优化的激光直写工艺参数,见表1。

到的实验结果相比,所获得的波导无论从高宽比上还是形状上都有了很大改进^[4,9,10]。

采用Metricon2010棱镜耦合仪测定薄膜的厚度和折射率^[13]。通过芯层 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 薄膜在632.8 nm波长下 TE_0 和 TE_1 两个导光模式,由仪器自带软件计算得样品芯层薄膜厚度为0.51 μm ,折射率为1.70。

利用多通道光纤/波导耦合系统为芯层薄膜平面波导以及激光直写得到的条形波导进行通光测试,采用光纤端面耦合为波导通光,通光波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 。得到了导波光的近场像见图6(b)。对比

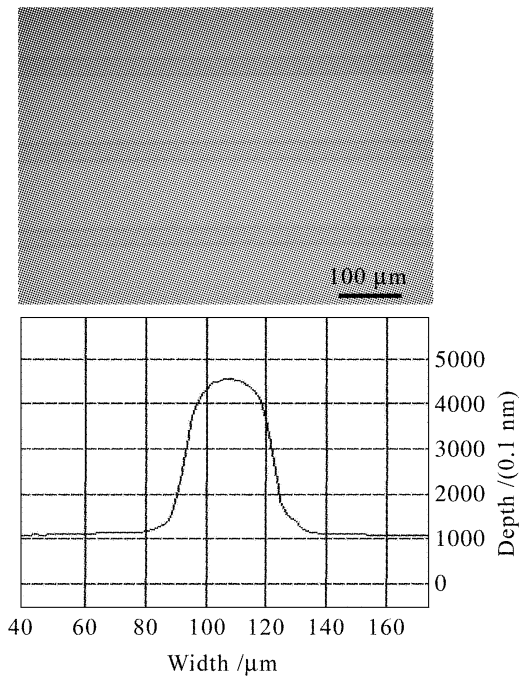


图 5 激光直写 500 °C 热处理的薄膜得到的条形波导的形貌及横截面轮廓($4.026 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, 1 mm/s)

Fig. 5 Photo of the strip waveguides (after chemical etching) and its transverse profile gotten by laser direct writing of film annealed at 500 °C annealed film

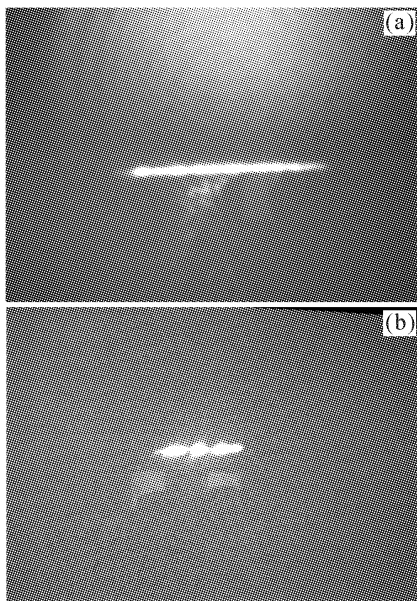


图 6 芯层薄膜平面波导以及激光直写得到条形波导的光传输近场像(通光波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$)

Fig. 6 Near field mode profile photographs of the planar waveguide and stripe waveguide fabricated by laser direct writing with a 1550 nm laser

直写前平板波导的光场分布(图 6(a)), 可以发现激光直写制得的光波导起到了对光横向限制, 形成了三维光波导。

4 结 论

1) 激光直写 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 芯层薄膜存在着起始收缩阈值 (F_s) 与烧蚀损伤阈值 (F_d), 激光直写的功率密度 F 必须满足 $F_s < F < F_d$ 条件才能获得良好成型而不出现损伤的条形波导。

2) 激光直写波导时光斑直径存在着一个临界光斑直径 (D_c)。当光斑直径小于 D_c 时, 无法获得成型的条形波导; 当光斑直径大于或等于 D_c 时, 激光直写能获得良好成型的条形波导, 但是波导的宽度也随光斑增大而增大。采用临界光斑直径进行激光直写是获得良好固化且宽度最窄的波导线条的关键。

3) 薄膜的激光直写阈值随其热处理温度提高而增大, 其中损伤阈值的增大趋势要大于收缩阈值, 这使得临界光斑直径变小。直写波导宽度随薄膜热处理温度提高显著减小, 对于 500 °C 热处理的薄膜, 激光直写所得到的波导宽度可以控制在 30 μm 以内。

参 考 文 献

- 1 Qi Xiaojing, Liu Jingwei, Li Xiangyou *et al.*. A new technology of conductive line preparation by laser micro-cladding metal-organic pastes on PCB board [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):883~887
祁小敬, 刘敬伟, 李祥友 等. 一种激光微细熔覆直写布线的新技术[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7):883~887
- 2 Xu Bing, Wei Guojun, Chen Linsen. Research advances in technology of laser direct writing [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, **17**(6):1~5
徐 兵, 魏国军, 陈林森. 激光直写技术的研究现状及其进展[J]. *光电子技术与信息*, 2004, **17**(6):1~5
- 3 B. D. Fabes, D. J. Taylor, L. Weisenbach *et al.*. Laser processing of channel waveguide structures in sol-gel coatings [C]. *SPIE*, 1990, **1328**:319~328
- 4 T. C. Zaugg, B. D. Fabes, L. Weisenbach *et al.*. Waveguide formation by laser irradiation of sol-gel coatings [C]. *SPIE*, 1991, **1590**:26~35
- 5 D. J. Taylor, B. D. Fabes. Laser processing of sol-gel coatings [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1992, **147**(48):457~462
- 6 B. D. Fabes, B. J. Zelinski, D. J. Taylor *et al.*. Laser densification of optical films [C]. *SPIE*, 1992, **1758**:227~234
- 7 M. Guglielmi, P. Colombo, L. Mancinelli *et al.*. Planar and strip optical waveguides by sol-gel method and laser densification [C]. *SPIE*, 1991, **1513**:44~49
- 8 Stefano Pelli, Giancarlo C. Righini, Alessandro Verciani *et al.*. Laser writing of optical waveguides in sol-gel films [C]. *SPIE*, 1994, **2213**:58~63
- 9 Stefano Pelli, Giancarlo C. Righini, Antonio Scaglione *et al.*. Direct laser writing of ridge optical waveguides in silica-titania glass sol-gel films [J]. *Optical Materials*, 1996, **5**(1-2):119~126
- 10 Jiwei Zhai, Liangying Zhang, Xi Yao *et al.*. Characteristics of laser-densified and conventionally heat treated sol-gel derived

- silica-titania films [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, **138**(2-3):135~140
- 11 Pang Lin, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Characteristics of sol-gel dip-coating for fabricating microstructure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):151~154
庞霖,严瑛白,金国藩等. 基于微结构制作的溶胶凝胶浸渍成膜特性[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(2):151~154
- 12 Li Xiangyou, Li Yaobing, Liu Dongsheng *et al.*. Study of laser micro-cladding system to circuit boards fabrication [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(5):258~260
李祥友,李耀兵,刘冬生等. 激光微熔覆柔性布线系统研究及应用[J]. *应用激光*, 2004, **24**(5):258~260
- 13 Zhao Xiaoxiang, Xu Zhengquan. Measurement of refractive index of substrate materials of optical waveguides with a prism coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(6):426~429
赵孝祥,许政权. 利用棱镜耦合器测量光波导衬底的折射率[J]. *中国激光*, 1992, **A19**(6):426~429

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。提交摘要和论文需同时发送到电子邮箱 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

联系人: 翟林 zhailin@hotmail.com Tel: 010-62641108, 13651149955

李翠玲 cuilingli@bit.edu.cn Tel: 010-68912564, 13521121045

丁伯瑜 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