

文章编号: 0253-2239(2007)08-1409-5

双面曝光长周期光纤光栅偏振相关损耗^{*}

王若崑¹ 饶云江^{1,2} 朱涛^{1,2} 谷彦菊²

(¹ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044
² 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 成都 610054)

摘要: 研究了采用高频 CO₂ 激光脉冲通过单面和双面曝光制作出的长周期光纤光栅(LPFG)的偏振相关损耗特性。单面曝光制作的长周期光纤光栅由于光纤横截面折射率改变不均匀,对入射光偏振态有较强的依赖性,主要表现为偏振相关损耗较大;为了降低偏振相关损耗,在制作长周期光纤光栅的过程中采用双面曝光的方法,使其横截面折射率调制受高频 CO₂ 激光曝光改变均匀。实验数据显示,高频 CO₂ 激光脉冲制作的普通单面曝光长周期光纤光栅最大偏振相关损耗高达 1.24 dB,而采用双面曝光的相同谐振峰值长周期光纤光栅的偏振相关损耗则可降至 0.42 dB。因此,双面曝光制作的长周期光纤光栅能较好地克服入射光偏振态的不良影响,从而满足对偏振敏感的光纤通信和传感系统的应用要求。

关键词: 导波与光纤光学; 偏振; 双面曝光; 长周期光纤光栅; CO₂ 激光

中图分类号: TB1 文献标识码: A

Polarization-Dependent Loss of Long-Period Fiber Grating Fabricated by Dual-Side Exposure Method

Wang Ruokun¹ Rao Yunjiang^{1,2} Zhu Tao^{1,2} Gu Yanju²

(¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044
² Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract: The polarization-dependent loss (PDL) of long-period fiber gratings (LPFGs) etched by high-frequency CO₂ laser pulses through single-side and dual-side exposure technologies was investigated. Long-period fiber gratings induced by the single-side exposure method depend greatly on the polarization state of incident light and have large polarization-dependent loss due to the asymmetry of refractive index profile in its cross section. A new dual-side exposure method is applied in long-period fiber gratings writing process to reduce polarization-dependent loss by uniforming the refractive index profile in the fiber cross section. Experimental results show that polarization-dependent loss of the long-period fiber gratings drops down to 0.42 dB by using dual-side exposure technology compared with 1.24 dB by the single-side exposure method. The dual-side exposure technique overcomes the influence of polarization state of incident light and can produce low-polarization-dependent loss long-period fiber gratings which can be widely used in optical fiber communication and sensing systems.

Key words: guided wave and fiber optics; polarization; double-side exposure; long-period fiber grating; CO₂ laser

1 引言

在光纤通信和光纤传感领域中,光学器件的偏振相关损耗意味着光功率会随着偏振态的变化而波

动,是一个影响系统稳定和灵敏度的重要参量,例如在使用长周期光纤光栅作为增益平坦器的掺铒光纤放大器中,高偏振相关损耗会引起信噪比的波动和

^{*} 国家自然科学基金重点基金(60537040)、教育部重点基金(104210)和重庆市自然科学基金(8415)资助课题。

作者简介: 王若崑(1982—),男,四川南充人,硕士研究生,主要从事长周期光纤光栅方面的研究。

E-mail: wangruokun@vip. sina. com

导师简介: 饶云江(1962—),男,云南保山人,教授,博士生导师,主要从事光纤通信及传感方面的研究。

E-mail: yjrao@cqu. edu. cn

收稿日期: 2006-11-24; 收到修改稿日期: 2007-01-31

误码率的增加^[1]。长周期光纤光栅^[2]对外界的各种敏感特性^[3,4]使其在光传感和通信领域中占有重要的一席之地。因此研究长周期光纤光栅的偏振相关损耗特性就显得意义重大。

不同方法制作出的长周期光纤光栅其偏振相关损耗特性往往相差较大。最常用的是用 248 nm 的紫外光通过振幅掩模板曝光氢载掺锗光纤^[5],利用掺锗光纤的光敏性引起纤芯发生周期性折射率调制从而形成长周期光纤光栅。这种紫外写入法的长周期光纤光栅虽然具有较小的偏振相关损耗^[6,7],但缺点是制作工艺复杂、制作成本高、不能随意改变光栅周期等参量。我们于 2000 年提出了一种用计算机控制的高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模光纤中写入长周期光纤光栅的方法,相比紫外写入法具有不需要掩模、成本低、写入效率高、对光纤结构的物理损伤小^[8]等优点,但实验表明该方法制作出长周期光纤光栅的偏振相关损耗较大。本文将探讨单面曝光所导致的横截面折射率分布不均匀,提出双面曝光以改善折射率分布的制作方法,并从实验上证明双面曝光对降低偏振相关损耗的可行性。

2 理论分析

单侧入射的高频 CO₂ 激光,在光纤表面同时产生反射和透射。在光纤面向激光入射的一侧,激光能量较强,温度较高,残余应力释放较多,折射率变化较大;而在光纤背向激光入射方向的一侧,激光能量较弱,温度较低,残余应力释放较少,折射率变化较小。因此单面曝光的结果就是使得透射光的能量沿激光入射方向逐渐减弱,从而导致折射率调制大小沿激光入射方向逐渐减弱。

长周期光纤光栅中的双折射效应主要包括两个方面,一方面是光纤自身的模式双折射,即偏振模色散,其起因是光纤纤芯的非圆性,即光纤拉制过程中遗留的椭圆变形;另一方面是激光诱导折射率调制引起的双折射,即单侧曝光导致光栅折射率横截面分布的不均匀。认为高频 CO₂ 激光写入的长周期光纤光栅的双折射最主要的原因就是单侧曝光导致的折射率横截面分布不均匀。

在没有双折射的理想长周期光纤光栅中,不同偏振态的入射光可以认为有着完全一样的传输谱线。双折射效应使得长周期光纤光栅对于不同偏振态的入射光呈现出不同传输特性,它改变了光栅传输谱的两个方面:1)原本只由相位匹配条件决定的谐振波长此时也依赖于入射光偏振态;2)不同偏振

态的入射光在通过同一长周期光纤光栅时有着不同的光功率损耗,即对应不同的谐振峰幅值。事实上每一个偏振态都对应着一个特定的传输谱,如图 1 所示,这些传输谱之间彼此的谐振峰值和谐振波长均不同,传输谱之间的差异越大,长周期光纤光栅的偏振相关损耗就越大。因此,对于传输随机自然光的长周期光纤光栅而言,减小其偏振相关损耗即是要缩小不同偏振态之间传输谱线的差异。

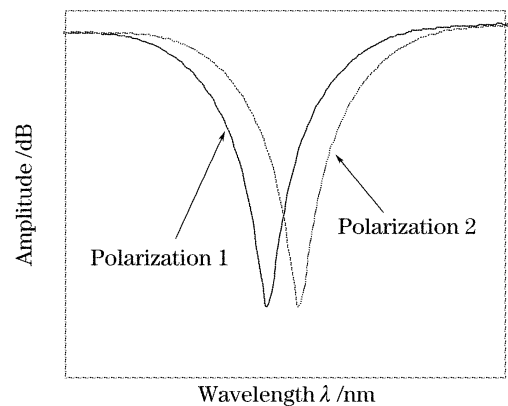


图 1 不同偏振态的长周期光纤光栅的传输谱线

Fig. 1 Typical transmission of a long-period fiber grating for different polarization states

首先从谐振波长的角度考虑,当长周期光纤光栅中没有双折射时,由相位匹配条件^[9]可得其谐振波长为

$$\lambda_{\text{res}} = \Lambda(n_{01} - n_{\text{nm}}) = \Lambda(\Delta n), \quad (1)$$

其中 Λ 为光栅周期, n_{01} 为纤芯基模, LP₀₁ 的有效折射率, n_{nm} 为包层模^[10] LP_{nm} 的有效折射率。当光栅引入双折射后,不同偏振态的入射光便对应着不同的纤芯基模和包层模的有效折射率。在所有可能的偏振态中,存在最大和最小的谐振峰值($\lambda_{\text{res}}^{\text{max}}$ 、 $\lambda_{\text{res}}^{\text{min}}$)分别对应着其最大和最小的纤芯—包层有效折射率差 Δn^{max} 、 Δn^{min} 。由于单模光纤纤芯直径(约 9 μm)相对整个光纤直径(125 μm)小得多,在光纤横截面纤芯只占有很小一部分面积,因此可以近似认为激光进入纤芯的能量均匀分布,这样所有偏振态的光在纤芯中有相同的基模有效折射率,于是不同偏振态对应谐振峰最大波长差值可近似由下式表示:

$$\Delta\lambda_{\text{res}} = \Lambda(n_{\text{nm}}^{\text{max}} - n_{\text{nm}}^{\text{min}}), \quad (2)$$

从(2)式可以看出谐振波长的不同只由包层模的有效折射率差和光栅周期决定。不同于紫外写入的长周期光纤光栅,CO₂ 激光写入的长周期光纤光栅正是靠改变包层折射率来制作长周期光纤光栅的。显然光栅周期对于任意偏振态都是一样的,而双面曝光的结果使得包层折射率分布趋于均匀,如图 2 所示,很大程度地减小了双折射,这样就缩小了不同偏

振态对应的包层模有效折射率差,从而减小了不同偏振态对应谐振峰波长差。

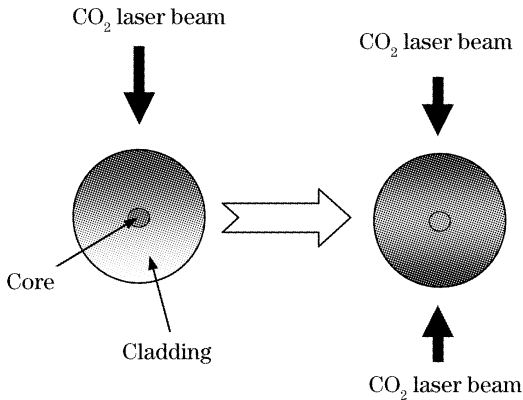


图 2 单面曝光和多面曝光的长周期光纤光栅包层折射率分布对比图

Fig. 2 Comparison between refractive index distribution in cladding of single-side and dual-side long-period fiber grating

其次从谐振峰的幅值看,我们考虑纤芯基模和包层模的传输常量及模式耦合系数。折射率调制的不均匀导致光纤出现对应不同折射率的快(f)、慢(s)轴。与长周期光纤光栅双折射光学主轴 f 和 s 对应的相互垂直的偏振光的传输常量 β_f 和 β_s 可表示为

$$\beta_f = \frac{2\pi}{\lambda} n_f, \quad \beta_s = \frac{2\pi}{\lambda} n_s, \quad (3)$$

某一偏振态入射光的长周期光纤光栅一阶包层模可以分解为两个相互垂直的偏振模 HE_f 和 HE_s 。因此,长周期光纤光栅对偏振模 HE_f 和 HE_s 的传输能力决定了对该包层模的传输能力,即 β_f 和 β_s 的合成决定了该偏振态下包层模的传输常量。根据前面的论述,折射率改变不均匀主要集中在包层,虽然各偏振态可认为有着相同的纤芯基模传输常量,但各偏振态其一阶包层模分解在 s 和 f 轴上的分量不同,该偏振态下包层模的传输常量也就不同,从而使纤芯基模与包层模的耦合系数随偏振态变化而变化,由长周期光纤光栅谐振峰透射率经验公式^[11] $T = \cos^2(KL)$ (K 为基模和包层模平均耦合系数, L 为光栅长度)可知长周期光纤光栅传输谱线的谐振峰值也因偏振态而异。

3 实验和制作过程

图 3 为双面曝光的高频 CO_2 激光写入法的系统结构图,它是在原来的单面曝光实验装置基础上改进的。用一对可绕轴向自由旋转的分度盘来固定待曝光的光纤,光纤必须水平放置在 CO_2 激光器聚

焦透镜的焦平面上,由于光纤在 CO_2 激光加热过程中可能产生物理延长,因此挂一重约 10 g 的重物使其保持水平状态。使用宽带光源做输入,光谱仪用来监视光纤谱线的变化。全功率为 10 W 的 CO_2 激光器由计算机控制,可调节输出激光脉冲的各种参量,通常输出 CO_2 激光脉冲的频率为 5 kHz,功率约为 0.5 W,波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 。在制作过程中,通过计算机控制使激光器在光纤上选定位置曝光写入一个光栅周期后,同向旋转两个分度盘 180° 曝光该光纤周期的背面,这样一个完整的双面长周期光纤光栅周期曝光完成。纵向移动激光器写入位置 0.5 mm,用同样的双面曝光方法先后曝光该光栅周期的正反面以写入下一个双面长周期光纤光栅周期,如此循环 60 个光栅周期。合理控制每个光栅周期曝光能量大小即可制得期望谐振峰值的双面曝光长周期光纤光栅。

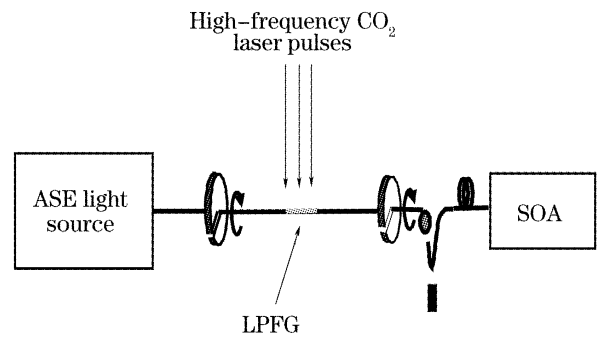


图 3 改进的高频 CO_2 激光写入长周期光纤光栅的装置图
Fig. 3 Improved setup for fabricating long-period fiber gratings using focused high-frequency CO_2 laser pulses

选用 Corning SMF-28 光纤,光栅周期为 $500 \mu\text{m}$,光栅数为 60,光纤总长度为 30 mm,分别制作出单面和双面曝光的长周期光纤光栅,并分别测出偏振光沿这两种光栅快、慢轴传播所对应的传输曲线如图 4 所示。偏振相关损耗测试装置如图 5 所示,从光源 Agilent 8164A 发出的光进入偏振分析仪 Agilent 8509c 成为偏振光再进入待测光栅,最后回到 8509c 进行分析。通过计算机监控 8164A 发出指定波长的光,8509c 测试该波长下光栅的偏振相关损耗并显示在计算机屏幕上(精确到小数点后两位)。单面和双面曝光长周期光纤光栅的偏振相关损耗测试结果如图 6 所示。可以看出,单面曝光长周期光纤光栅的偏振相关损耗的较大,最大值为 1.24 dB,显然如此大的偏振相关损耗在对偏振敏感的实际产品中是非常有害的;而通过双面曝光使其折射率调制均匀分布,最大偏振相关损耗已显著减小到 0.42 dB。此外,从图 4 两种长周期光纤光栅

对应快慢轴的传输曲线也可以看出,单面曝光长周期光纤光栅的谐振波长分离达 1.08 nm,相比双面曝光长周期光纤光栅的仅为 0.6 nm,谐振波长分离

值的降低也说明双面曝光长周期光纤光栅比单面长周期光纤光栅受偏振态的影响更小。

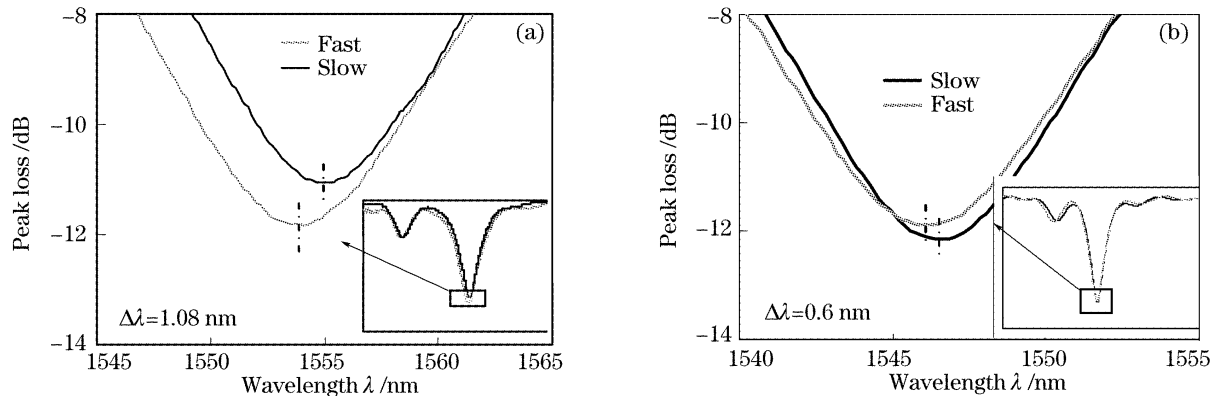


图 4 单面(a)和双面(b)曝光长周期光纤光栅快慢轴偏振光的传输曲线

Fig. 4 Transmission spectrum of the p-polarization and s-polarization light in single-side (a) and dual-side (b) exposed long-period fiber gratings

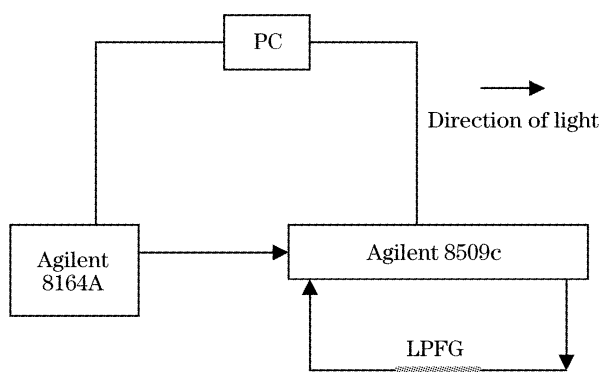


图 5 偏振相关损耗测试装置图

Fig. 5 Setup of instruments for polarization-dependent loss measurement

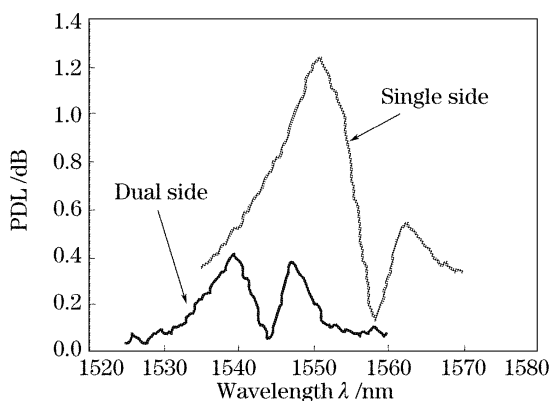


图 6 单面和双面曝光长周期光纤光栅的偏振相关损耗

Fig. 6 Polarization-dependent loss of the single-side and dual-side exposed long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses

4 结 论

当用高频 CO₂ 激光脉冲单侧写入普通单模光

纤时,由于曝光的一面对高频 CO₂ 激光吸收较强,而背向曝光激光的一面吸收较弱,导致制作出的长周期光纤光栅横截面折射率调制不均匀,从而具有较严重的双折射效应,并使得这种单面写入的长周期光纤光栅具有较大的偏振相关损耗。在用频率为 5 kHz,功率约为 0.5 W,波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光脉冲写成周期为 500 μm,周期数 60 的长周期光纤光栅中,测得最大偏振相关损耗为 1.24 dB。在以上参量不变的情况下,通过双面曝光的方法,可将这种长周期光纤光栅的最大偏振相关损耗降低至 0.42 dB。实验表明,双面曝光的方法可以很大程度上降低单面曝光导致的光栅横截面折射率调制的非均匀性,减小由于这种不均匀性所带来的双折射效应,从而为这种新型长周期光纤光栅在具有低偏振相关损耗要求的光纤通信和传感系统中的应用奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 P. Lu, L. Chen, X. Bao. System outage probability due to the combined effect of PMD and PDL[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(10): 1805~1808
- 2 Gao Kai, Zhou Yinwu, Qu Ronghui *et al.*. Theoretical analysis of long-period moiré gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 427~430 (in Chinese)
高 侃,周赢武,瞿荣辉等. 长周期莫尔光栅的理论研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 427~430
- 3 Wang Yiping, Chen Jianping, Rao Yunjiang. Study on torsion characteristic of novel long-period fiber grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1091~1096 (in Chinese)
王义平,陈建平,饶云江. 新型长周期光纤光栅的扭曲特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1091~1096
- 4 Hu Aizi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang. A novel tunable LPFG gain equalizer based on a bend insensitive fiber[J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2005, **25**(1): 30~34 (in Chinese)
 胡爱姿, 饶云江, 牛永昌. 基于弯曲不敏感光纤的长周期光纤光栅可调谐增益均衡器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 30~34
- 5 Zheng Kai, Pei Li, Jian Shuisheng. Research on the characteristics of long-period fiber grating ultraviolet-written by amplitude mask[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 902~906 (in Chinese)
 郑凯, 裴丽, 简水生. 振幅掩膜紫外写入的长周期光纤光栅特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 902~906
- 6 B. L. Bachim, T. K. Gaylord. Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(34): 6816~6823
- 7 Yuu Ishii, Kensuke Shima, Satoshi Okude. PDL suppression on long-period fiber gratings by azimuthally isotropic exposure[J]. *IEICE trans. Electron.*, C2002, **E85-C**: 934~939
- 8 Yunjiang Rao, Yiping Wang, Zengling Ran *et al.*. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1320~1327
- 9 T. W. MacDougall, S. Pilevar, C. W. Haggans *et al.*. Generalized expression for the growth of long period gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10): 1449~1451
- 10 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 11 C. Y. Lin, L. A. Wang, G. W. Chern. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion and bending sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(8): 1159~1168

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自2004年5月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从2006年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年12册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10条,每篇不过2000字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的80%优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文300篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费2800元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款2800元至下列帐户:

开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
 帐号:1001700809026400195

- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn