

文章编号: 0258-7025(2009)06-1484-05

基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉 式高温应变传感器

饶云江^{1,2} 黎宏¹ 朱涛^{1,2} 邓明¹

¹重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

²电子科技大学通信与信息工程学院 宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 基于空芯光子晶体光纤(HCPCF)耐高温、温度稳定性好的特性,对利用空芯光子晶体光纤与两根普通单模光纤通过熔接构成的微小光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪进行了高温应变特性实验研究。结果表明,在100~700℃温度范围内,HCPCF F-P具有较好的温度稳定性,并测得600℃的温度下其应变测量的灵敏度约为5.94 nm/ $\mu\epsilon$,线性度约为0.9997,温度对应变灵敏度的最大影响约1.5%,测量精度约0.08% FS。理论和实验结果表明高温下HCPCF F-P具有温度灵敏度较低,应变灵敏度较高,温度对应变灵敏度的交叉影响小,线性度和重复性好,且没有迟滞现象以及应变测量范围大等优点。

关键词 导波与光纤光学; 光纤传感器; 法布里-珀罗干涉仪; 高温应变; 光子晶体光纤

中图分类号 TN253; TP 212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1484

High Temperature Strain Sensor Based on In-Line Fabry-Perot Interferometer Formed by Hollow-Core Photonic Crystal Fiber

Rao Yunjiang^{1,2} Li Hong¹ Zhu Tao^{1,2} Deng Ming¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

²Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks Technologies, Ministry of Education, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract Based on the characteristics of high temperature resistance and well temperature stability of hollow core photonic crystal fiber (HCPCF), high temperature strain response of the micro Fabry-Perot etalon (HCPCF F-P) fabricated by splicing a section of hollow core photonic crystal fiber in between two single-mode fibers is reported. Experimental results show that the HCPCF F-P has good temperature stability in the range of 100 °C to 700 °C, and the strain sensitivity and linearity of HCPCF F-P is ~ 5.94 nm/ $\mu\epsilon$ and ~ 0.9997 at 600 °C, respectively. The max cross-influence of temperature on the strain is just about 1.5%, and the measuring accuracy is about 0.08% FS. Furthermore, the theoretical and experimental results show that the temperature sensitivity and the influence of temperature on strain of the HCPCF F-P is low, while the sensitivity, linearity and repeatability of strain of the HCPCF F-P is very high. The strain sensor has large strain measure range and no hysteresis.

Key words guided wave and fiber optics; optical fiber sensors; Fabry-Perot interferometer; high temperature strain; photonic crystal fiber

收稿日期: 2008-08-08; 收到修改稿日期: 2008-10-06

基金项目: 国家自然科学基金面上及重点项目(60807019 和 60537040)、电子科技大学宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室开放课题及重庆大学青年教师创新能力基金资助项目。

作者简介: 饶云江(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信及传感技术方面的研究。

E-mail: fiberlab@cqu.edu.cn

1 引言

应变传感器的种类繁多,但应用于高温下的应变传感器却比较少。光传感器具有灵敏度高、稳定性好、抗电磁干扰能力强、适用范围广等优点,其中应用较多的是光纤布拉格光栅(FBG)与光纤法布里-珀罗(F-P)传感器。但 FBG 主要是利用紫外曝光写入,高温下 FBG 的长期稳定性差,通常最高温度不能高于 400 °C,而且应变与温度的交叉影响大^[1~4],不利于信号的解调。光纤 F-P 传感器具有体积小、应变灵敏度高、线性度和重复性好、测量精度高等优点,是应变测量的最佳传感器之一,在桥梁健康检测、超声波测量、压力测量等低温环境中得到广泛应用^[5~14]。随着对光纤 F-P 传感器研究的深入,光纤 F-P 传感器在结构上也出现多样化,普通的光纤 Fizeau 传感器^[6]和多模光纤作为干涉腔体形成的 F-P 干涉仪传感器^[11]具有普通 F-P 干涉仪的优良特性。但它们存在温度对应变的交叉影响大、制作腔长短等缺点。利用一段空芯光纤熔接两段单模光纤形成的在纤干涉仪(ILFE, in-line fiber etalon)传感器^[7]克服了温度对应变的交叉影响大的缺点,但这种传感器仍存在模式不匹配、光损耗大、发射谱对比度低、腔长短等不利因素。目前,高温下的应变测量主要依赖电应变传感器,但电设备不可避免地存在高温下寿命短、应变线性度低、抗电磁干扰能力差等缺点^[1]。

利用空芯光子晶体光纤(HCPCF)作为 F-P 干涉腔而制作成的新型在纤光纤 F-P 干涉式传感器(HCPCF F-P)具有不受电磁干扰、稳定性和可靠性好、分辨率和精度高、温度灵敏度小、制作简单、成本低等显著优点^[8,9]。文献[9]和[12]对 HCPCF F-P 的制作结构及 100 °C 以内的低温特性进行了报道。基于空芯光子晶体光纤耐高温以及温度稳定性好的优良特性,本文对 HCPCF F-P 进行了高温应变特性研究。提出将 HCPCF F-P 传感器应用于高温领域,实现高温下的高精度应变测量,弥补目前高温应变传感器种类少、精度低、制作成本高、信号处理难等不足。

2 HCPCF F-P 的白光干涉原理

HCPCF F-P 传感器是在一段 HCPCF 两端熔接上两段单模光纤制作而成。由于采用 HCPCF 作为干涉腔,光在干涉腔内的传输损耗很小,在满足光源光波干涉的条件下,干涉腔可以做得很长,且干涉光信号仍然具有很高的对比度^[12]。图 1 为由 HCPCF 制作的在纤 F-P 传感器的结构图及反射谱。

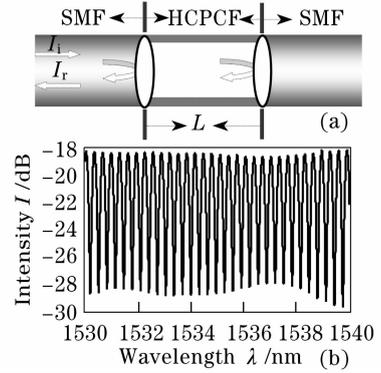


图 1 HCPCF F-P 的结构(a)和反射谱(b)

Fig. 1 Configuration (a) and reflective spectrum (b) of the HCPCF F-P cavity

由多光束干涉理论,HCPCF F-P 传感器的反射光强为

$$I_r = \frac{2R(1 - \cos\phi)}{1 + R^2 - 2R\cos\phi} I_i, \quad (1)$$

其中相位差为

$$\phi = (4\pi/\lambda)L. \quad (2)$$

I_i 为入射光强, R 为腔面反射率, L 为腔长。

由于 $R \ll 1$,从(1)式可以看出,在腔长 L 一定的情况下,光强相对于波长近似为一余弦曲线。当腔长变化时,特定波长的干涉光强也随之变化,在波长-光强关系图上,余弦曲线的周期和相位都发生变化,即波峰发生漂移,波峰间距也发生变化。

由(1)式可知,当 $4\pi L/\lambda = (2m-1)\pi$, $m=1, 2, 3, \dots$ 时,考虑光疏到光密的半波损耗,其波长处对应的反射光强为极小值;当满足 $4\pi L/\lambda = 2m\pi$, $m=1, 2, 3, \dots$ 时,其波长处对应的反射光强为极大值。设变化前后腔长分别为 L 和 L' ,取两相邻的波峰,其干涉级次分别为 m (对应波长为 λ_m 和 λ'_m) 和 $m-1$ (对应波长为 λ_{m-1} 和 λ'_{m-1}),可以得出

$$L = \frac{\lambda_m \lambda_{m-1}}{2(\lambda_{m-1} - \lambda_m)}, \quad (3)$$

$$L' = \frac{\lambda'_m \lambda'_{m-1}}{2(\lambda'_{m-1} - \lambda'_m)}, \quad (4)$$

由(3)和(4)式可求出 HCPCF F-P 的温度灵敏度 S_T 和应变灵敏度 S_ϵ

$$S_T = \frac{|L' - L|}{\Delta T}, \quad (5)$$

$$S_\epsilon = \frac{|L' - L|}{\Delta \epsilon}, \quad (6)$$

其中, ΔT 为温度变化量, $\Delta \epsilon$ 为应变变化量。

3 实验结果及讨论

高温应变实验装置如图 2 所示,光源及

HCPCF F-P 形成的反射谱都由一台高精度光谱仪 (Si720, Micron Optics, USA) (波长扫描范围为 1520~1570 nm, 扫描精度为 2.5 pm) 分别产生和接收; 可调高温炉 (Lenton, UK) 实现对温度的调节和控制; 两个高精度微动台 (Newport 561D) (精度为 10 $\mu\text{m}/\text{div}$) 用于给 HCPCF F-P 施加应力, 两微动台之间的距离为 145 cm。实验前, 将 HCPCF F-P 两端的光纤固定在两个微动台上, 将 HCPCF F-P 置于高温炉的中间以保证受热均匀, 调节微动台使光纤处于一种弱绷直状态, 将此状态作为初始状态。为避免光纤涂敷层给测量带来影响, 实验前将两微动台间的光纤涂敷层剥去。

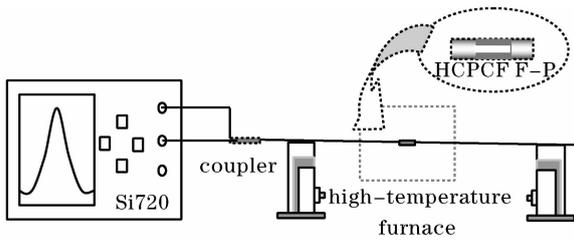


图 2 HCPCF F-P 高温应变实验装置

Fig. 2 Experimental set-up for high temperature strain measurement of HCPCF F-P

首先对干涉腔长约 3.75 mm 的 HCPCF F-P 重复进行 3 次 100 $^{\circ}\text{C}$ 到 800 $^{\circ}\text{C}$ 的高温实验, 实验结果如图 3 所示。可以看出, 在 100 $^{\circ}\text{C}$ 到 700 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, HCPCF F-P 的腔长长度随温度变化而出现较小的波动, 特别 250 $^{\circ}\text{C}$ 到 700 $^{\circ}\text{C}$ 的腔长变化尤为平坦。3 次测量取均值后, 测得 100 $^{\circ}\text{C}$ 到 700 $^{\circ}\text{C}$ 时的腔长改变量仅约 98.13 nm。温度在 700 $^{\circ}\text{C}$ 以后, HCPCF F-P 腔长变化随温度的升高变陡, 从 700 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 800 $^{\circ}\text{C}$ 时的腔长改变量约 572.25 nm。结果表明, 在 100 $^{\circ}\text{C}$ 到 700 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内 HCPCF F-P 对温度不敏感, 而且温度低于 800 $^{\circ}\text{C}$ 时, 该传感器能保

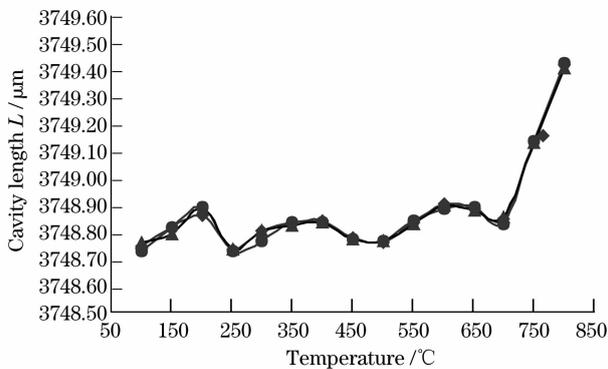


图 3 HCPCF F-P 的高温响应实验

Fig. 3 High temperature responses of the HCPCF F-P

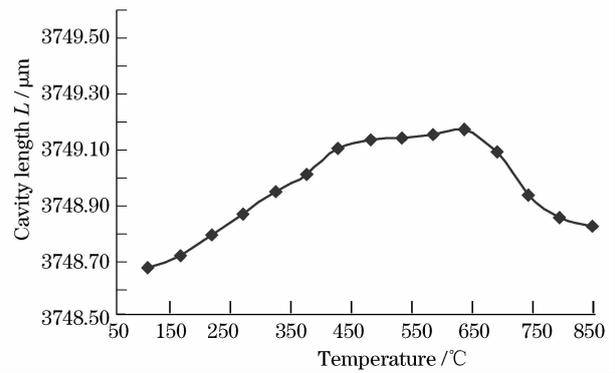
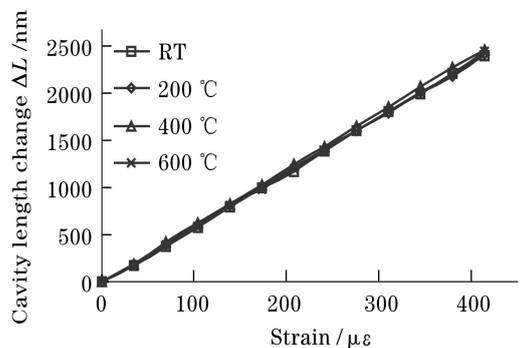


图 4 1000 $^{\circ}\text{C}$ 作用后 HCPCF F-P 的腔长-高温曲线

Fig. 4 High temperature response curve of HCPCF F-P after being changed in the high temperature of 1000 $^{\circ}\text{C}$ 持较好的温度重复性。实验还发现当温度升高到 1000 $^{\circ}\text{C}$ 后, HCPCF F-P 的材料内部结构将发生变化, 变化后的 HCPCF F-P 的腔长-高温曲线如图 4 所示。

HCPCF F-P 在不同温度下的应变实验过程如下: 从初始状态开始以 5 小格 (50 μm) 为单位调节微动台拉伸光纤。当微动台调节 60 小格 (600 μm , 即 414 $\mu\epsilon$) 后又以 5 小格为单位返回初始状态, 重复此应变循环过程 3 次。应变量为 414 $\mu\epsilon$ 时, 室温, 200 $^{\circ}\text{C}$, 400 $^{\circ}\text{C}$, 600 $^{\circ}\text{C}$, HCPCF F-P 的腔长变化量分别是 2424.00 nm, 2438.76 nm, 2477.79 nm, 2454.25 nm, 应变灵敏度分别为 5.93 $\text{nm}/\mu\epsilon$, 5.86 $\text{nm}/\mu\epsilon$, 6.02 $\text{nm}/\mu\epsilon$, 5.94 $\text{nm}/\mu\epsilon$, 应变线性度分别为 0.9998, 0.9998, 0.9999, 0.9997。单次实验与 3 次平均的偏差分别约 $\pm 3.21 \text{ nm}$, $\pm 0.42 \text{ nm}$, $\pm 6.35 \text{ nm}$, $\pm 6.49 \text{ nm}$, 实验结果如图 5 所示。以上数据和曲线表明, HCPCF F-P 的应变线性度极高, 重复性好, 没有滞后现象。而且, 不同温度下 HCPCF F-P 的应变灵敏度大小在常温下的应变灵



5 室温, 200 $^{\circ}\text{C}$, 400 $^{\circ}\text{C}$, 600 $^{\circ}\text{C}$ 时 HCPCF F-P 的应变曲线
Fig. 5 Curves of the HCPCF F-P cavity length changes at the temperature of 200 $^{\circ}\text{C}$, 400 $^{\circ}\text{C}$, 600 $^{\circ}\text{C}$ and room temperature (RT), respectively

敏度值的微小范围内波动。并且这种波动在改进实验装置和操作手段的情况下可以进一步得到改善。实验中 600 °C 高温下所测得的应变灵敏度的波动偏差最大约 ±1.5%，表明该传感器能很好地消除温度对应变灵敏度的交叉敏感性。

最后在 200 °C 时对 HCPCF F-P 进行了极限应变实验。显示当应变达到极限，即 HCPCF F-P 被绷断时，HCPCF F-P 的极限腔长改变量约 7808.48 nm，如图 6 所示。重复性实验中，600 °C 高温下所测得的应变最大偏差约 ±6.49 nm，可知该传感器的最大相对偏差约 ±0.08% FS。而且，温度从 100 °C 升高到 700 °C 时，温度引起的最大腔长改变量仅占应变引起的腔长极限改变量的 1.26%，表明该传感器在 700 °C 以下温度范围内对温度不敏感。在显微镜下观察发现，在极限应变实验中 HCPCF F-P 的断点发生在光子晶体光纤和单模光纤的焊接点处。这可以通过选择适当的熔接参数增强熔接点的机械强度，从而增加极限应变变量。

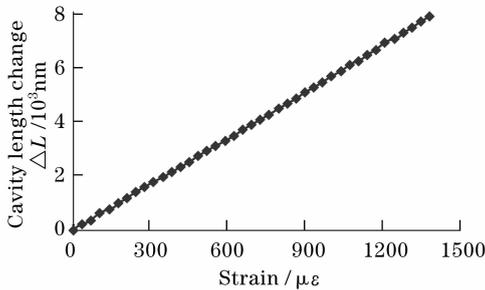


图 6 200 °C 时 HCPCF F-P 的极限应变曲线

Fig. 6 Curve of the HCPCF F-P cavity length changes under ultimate strain at 200 °C

HCPCF F-P 具有温度灵敏度低、应变敏感度和测量精度高、应变线性度和重复性好、没有滞后现象等优点。相对 FBG 等传感器的应变灵敏度是温度的函数的性质^[10]，HCPCF F-P 还具有温度对应变灵敏度的交叉影响小的显著优点。不同温度下其应变灵敏度大小在某一恒值上做微小的波动。将这一恒值近似取常温下的应变灵敏度值，可实现高温下较高准确度的应变测量，避免了 FBG 等其他传感器由于温度与应变的交叉影响给信号处理所带来的难题。实际应用中，根据 HCPCF F-P 传感器所应用的环境进行温度估计（或者实际温度测量），通过不同温度分区应变灵敏度值的标定，可实现高温下 0.08% FS 高精度应变测量。同时，HCPCF F-P 具有耐高温的特性。在温度低于 800 °C 时，空芯光子晶体光纤的材料结构不会受到损伤，HCPCF F-P 保

持完好。实验中，该传感器在数天的高温应变测量环境下，测量结果仍保持着良好的应变线性度和稳定性。因此 HCPCF F-P 能在长期的高温下稳定地对应变进行精确测量。

4 结 论

对利用 HCPCF 制作的在纤 F-P 干涉式传感器 (HCPCF F-P) 进行了高温应变特性实验研究。结果显示，在 700 °C 的高温下，HCPCF F-P 具有温度灵敏度低、应变灵敏度和测量精度高、线性度和重复性好。温度对应变灵敏度的交叉影响小，没有滞后现象等优点，能够满足高温环境中对高精度应变测量的需要。因此这种传感器在光纤高温传感领域将具有极大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 A. C. R. Grayson, R. S. Shawgo, A. M. Johnson *et al.*. A BioMEMS review: MEMS technology for physiologically integrated devices[J]. *Proc. IEEE*, 2004, **92**(1):6~21
- 2 Zhu Tao, Rao Yunjiang, Mo Qiuju *et al.*. Low cost sensing system for simultaneous measurements of temperature, strain and torsion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 655~658
朱涛, 饶云江, 莫秋菊等. 温度/应变/扭曲三参量同时测量低成本传感系统[J]. *光学学报*, 2006, **35**(5): 655~658
- 3 Guan Baiou, Tam H. Y., Ho S. L. *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):827~830
关柏鸥, Tam H. Y., Ho S. L. 等. 用一根光纤光栅实现温度与应变的同时测量[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6):827~830
- 4 Qiao Xueguang. Error analysis of simultaneous strain and temperature measurement with optical fiber Bragg grating sensor [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(5):272~274
乔学光. 光纤布拉格光栅传感器应力和温度同时测量时的误差分析[J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(5): 272~274
- 5 T. W. Kao, H. F. Tayler. High-sensitivity intrinsic fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8): 615~617
- 6 Zhou Changxue, Rao Yunjiang, Zhu Tao. SFDM/ CWDM of Fiber-optic fizeau strain sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11):1472~1476
周昌学, 饶云江, 朱涛. 光纤非依应变传感器的波分复用方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1472~1476
- 7 J. Sirkis, T. A. Berkoff, R. T. Jones *et al.*. In-line fiber etalon (ILFE) fiber-optic strain sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7):1256~1263
- 8 Shaoji Jiang, Youcheng Liang, Xi Zhu *et al.*. Asymmetric Fabry-Perot interferometric cavity for fiber optical sensors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10):563~565
- 9 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
段德稳, 朱涛, 饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微小型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):17~20
- 10 Zhang Xiaojing, Wu Zhanjun, Zhang Boming *et al.*. Experimental study on cross-sensitivity of temperature and strain

- of fiber optic Bragg gratings[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(5):566~569
- 张晓晶, 武湛君, 张博明等. 光纤布拉格光栅温度和应变交叉灵敏度的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(5):566~569
- 11 Zhengyu Huang, Yizheng Zhu, Xiaopei Chen *et al.*. Intrinsic Fabry-Pérot fiber sensor for temperature and strain measurements[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2403~2405
- 12 Y. J. Rao, T. Zhu, X. C. Yang *et al.*. In-line fiber-optic etalon formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18): 2662~ 2664
- 13 Zhao Hong, Li Ming, Zhang Ying *et al.*. Characteristics of output signal of extrinsic fiber Fabry-Perot acoustic sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(6):1018~1023
- 赵洪, 李敏, 张影等. 非本征法珀型超声传感器输出信号的特征[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(5):1018~1023
- 14 Gan Xiong, Zhu Yong, Zhang Peng *et al.*. Multi-channel fiber optical Fabry-Perot strain testing system for the shibanpo yangtze river bridge[J]. *China. Measurement Technology*, 2008, **34**(1): 128~130,140
- 甘雄, 朱永, 章鹏等. 石板坡长江大桥多通道光纤法珀应变测量系统[J]. *中国测量技术*, 2008, **34**(1): 128~130,140

《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊(EI核心收录)上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

特邀组稿专家:

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期: 2009年9月30日

投稿方式以及格式:

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱: zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿),或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部