

文章编号: 0258-7025(2009)03-0672-05

# 超长周期光纤光栅光谱特性的数值模拟

颜爱东 张伟刚 姜萌 刘卓琳 张春艳 林锦海 尚佳彬 王春宝

(南开大学现代光学所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 超长周期光纤光栅(ULPFG)是一种新型的周期长达几毫米的带阻型光纤器件,以 ULPFG 为元件的相关器件已用于多参数感测。基于模式耦合理论和简化的单模光纤三层模型,提出了一种在单模光纤中写制的 ULPFG 传输谱特性的数值模拟方法。数值模拟过程中使用线性插值简化了计算,模拟计算得到的 ULPFG 光谱谐振峰波长与已报道的实验结果相符,验证了该方法的有效性和近似处理的合理性。

**关键词** 光纤光学; 超长周期光纤光栅; 传输谱; 数值模拟

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0672

## Numerical Simulation Calculation on Spectrum Properties of Ultra Long Period Fiber Grating

Yan Aidong Zhang Weigang Jiang Meng Liu Zhuolin Zhang Chunyan  
Lin Jinhai Shang Jiabin Wang Chunbao

(*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education,*  
*Institute of Modern optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

**Abstract** A ultra long period fiber grating (ULPFG) is a novel band-rejection fiber device with periods up to several millimeters. Some related devices have been used in measurement of multi-parameter, but it's reported very few on how to simulate its transmission spectrum properties. On the base of coupled-mode theory and simplified three-layered model, a numerical method is proposed to simulate the transmission of the ULPFG written in single mode fiber and the linear interpolation is used to simplify the calculation. By using this algorithm, the calculation resonant wavelengths generally agree with the experimental results previously reported, which verifying the validity and reasonability of the algorithm and theory basis and effective analysis method for the witting providing ULPFG.

**Key words** fiber optics; ultra long period fiber grating; transmission spectrum; numerical simulation

## 1 引言

超长周期光纤光栅(ULPFG)是近年来提出的一种新型光栅。目前,对长周期光纤光栅(LPFG)的研究主要集中在周期为几十到几百微米的传统长周期光栅<sup>[1,2]</sup>,而对周期达到毫米量级的超长周期光纤光栅研究得很少。由于 ULPFG 的周期远远大于普通长周期光纤光栅的周期,所以 ULPFG 的谱线形状呈现出与普通长周期光纤光栅不同的特性。X. W. Shu 等<sup>[3]</sup>在 2002 年首次报道了用紫外光写

入的 ULPFG,并且指出 ULPFG 各谐振峰是由纤芯基模与各阶次包层模同向耦合而成。朱涛等<sup>[4]</sup>在 2005 年采用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入了周期为 3mm 超长周期光纤光栅,其折射率改变主要发生在光纤包层,这种方法写入的 ULPFG 比用紫外光写入的 ULPFG 具有更好的耦合效率、更低的插入损耗和更低的器件成本。在 ULPFG 的透射谱上将会出现多个谐振峰,由于超长周期光纤光栅各个谐振峰的阶次及包层模次数彼此不同,它们对外界环境变化

收稿日期: 2008-12-09; 收到修改稿日期: 2008-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(10674075,60577018)和国家 863 计划(2006AA01Z217)资助课题。

作者简介: 颜爱东(1985-),男,硕士研究生,主要从事光子技术及光通信方面的研究。E-mail: yanad@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 张伟刚(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

的灵敏度应该有所差别,而且有些谐振峰对外界环境参数变化的灵敏度也应与普通长周期光纤光栅谐振峰有所不同,这对传感领域中的高灵敏度测量及多参数测量<sup>[5~7]</sup>都有着重要的潜在应用价值。T. Zhu 等<sup>[8,9]</sup>研究指出 ULPG 的不同谐振峰对折射率和温度参数有不同的敏感度,并据此实现了利用 ULPG 对折射率和温度进行同时测量。

对超长周期光纤光栅进行计算机数值模拟对于研究其光谱特性具有重要的意义,T. Zhu 等<sup>[10]</sup>指出超长周期光纤光栅的理论分析可以沿袭长周期光纤光栅的模式耦合理论,并且从实验上得到了这种光纤光栅的透射谱图,但如何运用理论分析进行计算机模拟仿真尚未提及。本文从长周期光纤光栅的模式耦合理论出发,对均匀折射率调制 ULPG 的传输谱特性进行了数值模拟,并给出了数值模拟的一般步骤及主要程序描述。

## 2 理论分析

周期在毫米量级的超长周期光纤光栅,其周期已经远超出了前人所研究过的长周期光纤光栅的周期范围,对于同一长度的光纤,超长周期光纤光栅的

写入点数也要远少于普通长周期光纤光栅,但由于超长周期光纤光栅仍属于透射型光栅,其很多特性都与周期在几百微米的长周期光纤光栅有着相似之处,所以超长周期光纤光栅在本质上仍然属于长周期光纤光栅,在对超长周期光纤光栅进行理论分析时,可以借鉴长周期光纤光栅的理论分析方法,即先从模式耦合理论分析长周期光纤光栅,在此基础上推广到超长周期光纤光栅。

### 2.1 长周期光纤光栅的模式耦合

模式耦合理论是分析光纤光栅最基本的方法<sup>[11,12]</sup>,其最突出的优点在于能够诠释光波在波导中的物理行为,即波导中的不同模式之间的能量交换行为。在理想的单模光纤中,纤芯基模和光纤包层中存在的各阶次模式之间相互正交,模式之间没有能量耦合,但当在单模光纤中写入光栅后,由于沿纵向方向上折射率的周期性变化,将导致波导内传播模式之间的正交性被破坏,在不同的传播模式之间产生能量耦合。

光纤光栅的产生机制是折射率周期性变化,在阶跃型单模光纤中,假设光纤光栅的折射率变化为在这里所考虑的光纤光栅的折变作用仅存在于纤芯

$$n(r, z) = \begin{cases} n_1 \{1 + \sigma(z)[1 + m \cos(2\pi z/\Lambda)]\}, & r \leq a_1 \\ n_2, & a_1 \leq r \leq a_2, \\ n_3. & r \geq a_2 \end{cases} \quad (1)$$

中,包层不受影响, $\sigma(z)$ 表示光栅折射率调制大小沿 $z$ 轴方向变化的包络,在均匀光栅光纤中, $\sigma(z)$ 为常数, $m$ 为折射率调制的条纹可见度, $\Lambda$ 为光栅的周期。

在理想光纤模式近似条件下,光纤光栅中电磁波的横向分量可以表示为理想模式的叠加

$$E^T(x, y, z, t) = \sum_{\mu} [A_{\mu}(z) \exp(i\beta_{\mu} z) + B_{\mu}(z) \exp(-i\beta_{\mu} z)] e_{\mu}^T(x, y) \exp(-i\omega t), \quad (2)$$

式中 $A_{\mu}(z)$ 和 $B_{\mu}(z)$ 分别表示第 $\mu$ 阶模场沿 $+z$ 和 $-z$ 方向缓慢变化的幅度, $\beta = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}$ 为传播常数,横向模场 $e_{\mu}^T(x, y)$ 可以表示纤芯导模、包层模或辐射模。在理想情况下,不同模式之间没有能量耦合,而光栅周期性介电微扰的引入将导致模间耦合,在这种情况下, $A_{\mu}(z)$ 和 $B_{\mu}(z)$ 沿纵向的变化为<sup>[12]</sup>

$$\frac{dA_{\mu}}{dz} = i \sum_{\nu} A_{\nu} (K_{\nu\mu}^t + K_{\nu\mu}^z) e^{i(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z} + i \sum_{\nu} B_{\nu} (K_{\nu\mu}^t - K_{\nu\mu}^z) e^{-i(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z}, \quad (3)$$

$$\frac{dB_{\mu}}{dz} = -i \sum_{\nu} A_{\nu} (K_{\nu\mu}^t - K_{\nu\mu}^z) e^{i(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z} - i \sum_{\nu} B_{\nu} (K_{\nu\mu}^t + K_{\nu\mu}^z) e^{-i(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z}. \quad (4)$$

在单模光纤中写入长周期光纤光栅,其模式耦合为纤芯基模与同向的各阶次包层模式之间的耦合,所以只需考虑纤芯基模和一阶包层模之间的耦合,忽略纤芯基模与其他高阶次包层模式之间耦合。对于折射率调制集中在纤芯的光纤光栅,包层模之间的耦合系数 $K_{1\nu-1\mu}^{\text{cl-cl}}$ 远小于纤芯基模与包层模式之间的耦合系数 $K_{1\nu-01}^{\text{cl-co}}$ ,所以包层模式间耦合系数 $K_{1\nu-1\mu}^{\text{cl-cl}}$ 可以忽略;模式间耦合轴向耦合系数 $K_{\nu\mu}^z$ 远小于横向耦合系数 $K_{\nu\mu}^t$ ,因此在计算中轴向耦合系数 $K_{\nu\mu}^z$ 通常也可以忽略,而只考虑模式间的横向耦合系数 $K_{\nu\mu}^t$ 。经过以上简化和近似,可以得到纤芯基模与同向传输的一阶各次包层模式耦合的耦合方程为<sup>[12,13]</sup>

$$\frac{dA^{\text{co}}}{dz} = iK_{01-01}^{\text{co-co}} A^{\text{co}} + i \sum_{\nu} \frac{m}{2} K_{1\nu-01}^{\text{cl-co}} A_{\nu}^{\text{cl}}.$$

$$\exp(-i2\delta_{1\nu-01}^{\text{cl-co}} z), \quad (5)$$

$$\sum_{\nu} \left[ \frac{dA_{\nu}^{\text{cl}}}{dz} = i \frac{m}{2} K_{1\nu-01}^{\text{cl-co}} A^{\text{co}} \exp(i2\delta_{1\nu-01}^{\text{cl-co}} z) \right], \quad (6)$$

式中  $A^{\text{co}}$  为正向传输的纤芯基模的幅值,  $A_{\nu}^{\text{cl}}$  为正向传输的一阶  $\nu$  次包层模的幅值;  $\delta_{1\nu-01}^{\text{cl-co}}$  表示纤芯基模与同向传输的一阶  $\nu$  次包层模之间的失调量, 表达式为

$$\delta_{1\nu-01}^{\text{cl-co}} = \frac{1}{2} \left( \beta_{01}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right). \quad (7)$$

理论上通过设定光纤光栅的各个参数, 再结合边界条件, 可以通过求解微分方程组(5)和(6)得到超长周期光纤光栅的透射谱。但是在实际求解过程中, 由于超长周期光纤光栅中存在着上百个一阶各次包层模式, 这些包层模式均与纤芯基模发生耦合, 即使忽略一阶高次包层模与纤芯基模的耦合, 微分方程组(5)和(6)仍会包含数十个微分方程, 因此超长周期光纤光栅的透射谱难以直接进行模拟计算, 需要引入一些方法简化计算。

先考虑纤芯基模与一个包层模式之间的耦合, 由于只包含两个模式的耦合, (3)式和(4)式所表示的耦合方程可以近似为<sup>[12]</sup>

$$\frac{dA^{\text{co}}}{dz} = i\hat{\sigma}A^{\text{co}}(z) + i\kappa A^{\text{cl}}(z), \quad (8)$$

$$\frac{dA^{\text{cl}}}{dz} = -i\hat{\sigma}A^{\text{cl}}(z) + i\kappa^* A^{\text{co}}(z), \quad (9)$$

式中  $\hat{\sigma}$  表示直流耦合系数, 即自耦合系数,  $\kappa$  表示交叉耦合系数, 这里即为纤芯基模与包层模式之间的耦合系数。(8)式和(9)式为常微分方程组, 设定边界条件为: 在光纤入射端纤芯基模取能量最大值  $A^{\text{co}}(0) = 1$ , 此时, 包层能量  $A^{\text{cl}}(0) = 0$ , 可以得到在经过光栅后已耦合到包层中的能量的比例, 即交叉耦合率为

$$t_x = \frac{|A^{\text{cl}}(z)|^2}{|A^{\text{co}}(0)|^2} = \frac{1}{1 + (\hat{\sigma}^2/\kappa^2)} \sin^2(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2} z), \quad (10)$$

其中自耦合系数和交叉耦合系数可以分别近似表示为

$$\hat{\sigma} = \pi \left( \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}} + \sigma n_1}{\lambda} - \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{\lambda_D} \right), \kappa = \frac{\pi \sigma n_1}{\lambda}, \quad (11)$$

由此可以得到长周期光纤光栅透射谱的计算方法, 由(10)式可得

$$t_{x,\nu} = \frac{|A^{\text{cl}}(z)|^2}{|A^{\text{co}}(0)|^2} = \frac{1}{1 + (\hat{\sigma}_{\nu}^2/\kappa_{\nu}^2)} \sin^2(\sqrt{\kappa_{\nu}^2 + \hat{\sigma}_{\nu}^2} z), \quad (12)$$

其中  $\hat{\sigma}_{\nu} = \frac{1}{2} \left( \beta_{01}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) + \frac{1}{2} \kappa_{01-01}^{\text{co-co}}, \kappa_{\nu} = \frac{1}{2} \kappa_{1\nu-01}^{\text{cl-co}}$ , 代入(12)式后可以求得透射率为

$$t_p = 1 - \sum_{\nu} t_{x,\nu}. \quad (13)$$

通过上面的方法, 可以方便地求解出长周期光纤光栅的透射谱如图 1 所示。

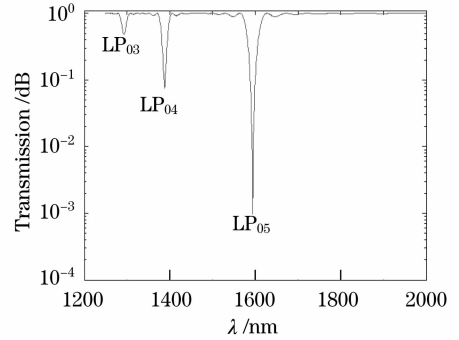


图 1 长周期光纤光栅的透射谱

Fig. 1 Transmission spectrum of long period fiber grating

## 2.2 超长周期光纤光栅的模式耦合

采用一般方法写入的光纤光栅, 其折射率变化量  $\Delta n(z)$  不会是标准余弦或正弦函数, 因此可以把  $\Delta n(z)$  展开为傅里叶级数<sup>[14]</sup>

$$\Delta n(z) = \Delta n_0 + \sum_{N=1}^{\infty} \left( A_N \cos N \frac{2\pi z}{\Lambda} + B_N \sin N \frac{2\pi z}{\Lambda} \right). \quad (14)$$

从(14)式可以看出, 实际写制的光栅可以看作周期是  $\Lambda/N$  的一系列正弦或余弦光纤光栅叠加而成, 当  $N > 1$  时, 所对应的模式称为高次谐波, 因此在计算长周期光纤光栅中的模式耦合时, 可能需要考虑纤芯基模与高次谐波的耦合。普通的长周期光纤光栅的周期范围一般在几十到几百微米之间, 若考虑纤芯基模与高次谐波的耦合, 可以发现这些谐振峰波长均小于计算的波长范围 (1250~2000 nm), 因此普通的长周期光纤光栅可以不考虑纤芯基模与高次谐波的耦合。而对于超长周期光纤光栅, 由于超长周期光纤光栅的周期远大于普通长周期光纤光栅, 在计算中需要考虑纤芯基模与高次谐波间的耦合, 因此在其透射谱中必然会出现较多高次谐波与纤芯基模发生耦合形成的谐振峰。因此超长周期光纤光栅的高阶模的相对相位匹配条件用有效折射率可表示为<sup>[3]</sup>

$$\lambda_D^{N,m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) \Lambda / N, \quad (15)$$

式中  $\lambda_D^{N,m}$  为光栅谐振峰波长,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  分别表示纤芯基模及  $m$  次包层模  $N$  次谐波的有效折射率,  $N$

表示谐波阶数。

### 3 超长周期光纤光栅的传输谱计算

为了简单起见,假设写入的超长周期光纤光栅的折射率调制为矩形,其纤芯折射率  $\Delta n(z)$  可以表示为

$$\Delta n(z) = \begin{cases} \sigma n_1 & n\Lambda \leq z \leq (n+p)\Lambda \\ 0 & (n+p)\Lambda \leq z \leq (n+1)\Lambda \end{cases}, \quad (16)$$

式中  $p$  为占空比,把  $\Delta n(z)$  展开为傅里叶级数可得

$$\Delta n(z) = p\sigma n_1 \left[ 1 + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{2}{pN\pi} \sin(Np\pi) \cdot \cos\left(\frac{2N\pi z}{\Lambda} - Np\pi\right) \right]. \quad (17)$$

由此可以看出,矩形折射率调制的超长周期光纤光栅可以看作是周期为  $\Lambda/N$  的一系列光纤光栅叠加而成的,即相当于在同一位置写入了多个不同周期的光纤光栅,这些光栅的折射率调制深度分别为  $\frac{2\sigma n_1}{N\pi} \sin(Np\pi)$ 。计算中采用 C598-302(s)型光敏光纤的参数:  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.4623$ ,  $n_2 = 1.458$ ,  $\Lambda = 3 \text{ mm}$ ,  $L = 30 \text{ mm}$ , 平均有效折射率调制  $\sigma n_1 = 1.71 \times 10^{-4}$ , 考虑到纤芯基模与高次谐波间的耦合,可以得到超长周期光纤光栅的透射谱如图 2 所示。

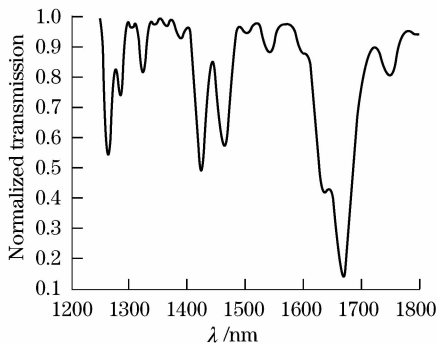


图 2 超长周期光纤光栅的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of ULPFG

经对图 1,2 中各谐振峰对比分析,可得到如下一些结论:

1) 与普通长周期光纤光栅相比,在超长周期光纤光栅的透射谱中,多了许多高次谐波与纤芯基模发生耦合形成的谐振峰;

2) 通过设计可以使一些谐振峰相互重合,使得超长周期光纤光栅谐振峰的带宽增大,这些特点可用于带通滤波器件的设计与研制<sup>[15]</sup>;

3) 由于超长周期光纤光栅具有更高的耦合效

率,因此其谐振峰的强度比普通长周期光纤光栅要弱。

### 4 结 论

在对超长周期光纤光栅的光谱特性进行数值模拟时,仍然沿用了在普通长周期光纤光栅理论分析中常用的单模光纤三层模型理论和模式耦合理论,数值模拟所得到的光谱图的谐振峰位置与已报道的实验测定超长周期光纤光栅的光谱图吻合得较好。因此,单模光纤三层模型理论和模式耦合理论仍可以用于超长周期光纤光栅的理论分析。研究的内容为实验写制超长周期光纤光栅提供了一种理论依据以及有效的分析方法。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 3 X. W. Shu, L. Zhang, I. Bennion. Fabrication and characteristics of ultra long period fibre gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**: 277~281
- 4 Zhu Tao, Rao Yunjiang, Mo Qiuju. Ultra-long period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1697~1700  
朱涛, 饶云江, 莫秋菊. 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的超长周期光纤光栅 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1697~1700
- 5 X. W. Shu, L. Zhang, I. Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 255~266
- 6 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685  
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 7 Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/Fabry-Perot sensor fabricated by laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 884~888  
廖弦, 饶云江, 冉曾令等. 激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗高温-应变组合传感器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 884~888
- 8 T. Zhu, Y. J. Rao, Q. J. Mo. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a single ultralong-period fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2700~2702
- 9 Rao Yunjiang, Mo Qiuju, Zhu Tao. A novel-high sensitivity refractive index sensor with temperature self-compensating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 264~268  
饶云江, 莫秋菊, 朱涛. 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 264~268
- 10 T. Zhu, Y. J. Rao, Q. J. Mo. Characteristics of novel ultralong-period fiber gratings fabricated by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(1): 84~88
- 11 A. Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(9): 919~933

- 12 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 13 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8):1760~1773
- 14 Chen Ru. Simulation of long-period fiber grating transmission spectral characteristics using matlab[J]. *Computer Simulation*, 2007, **24**(4):301~303
- 陈 儒. 长周期光纤光栅传输谱的 matlab 仿真[J]. *计算机仿真*, 2007, **24**(4):301~303
- 15 Liu Bo, Tong Zhongrong, Chen Shaohua *et al.*. A novel method of edge filter linear demodulation using long-period grating in fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):199~202
- 刘 波, 童峥嵘, 陈少华 等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性解调新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):199~202

## 《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“激光制造”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

截稿日期:2009年9月30日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“激光制造”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“激光制造”投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。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,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部