

文章编号: 1000-7032(2013)04-0500-06

# 光子晶体光纤中去极化声波导布里渊散射温度及应变响应

侯尚林<sup>1\*</sup>, 薛乐梅<sup>1</sup>, 王菊巍<sup>1</sup>, 刘延君<sup>1</sup>, 王道斌<sup>1</sup>, 徐永钊<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 数值求解了光子晶体光纤中的去极化型声波导布里渊散射色散方程, 研究了光子晶体光纤中的布里渊频移随泵浦波长及空气孔填充率的变化关系, 以及去极化型声波导布里渊散射频移随温度、应变、声波导模式、纤芯直径及空气孔层数的关系。结果表明: 布里渊频移随着波长的增大而线性减小。对于相同的波长点, 增大光子晶体光纤空气孔填充率时, 声波横向速度将会减小。去极化型声波导布里渊散射频移随温度及应变的增大而线性增加。同一温度条件下, 高阶  $TR_{2m}$  模式的去极化型声波导布里渊散射频移对温度的变化更为敏感; 而在同一应变条件下, 低阶  $TR_{2m}$  模式的去极化型声波导布里渊散射频移对应变的变化更为敏感。去极化型声波导布里渊散射频移随纤芯直径的增加而增大, 随空气孔层数的增加而减小。

**关键词:** 去极化型声波; 布里渊散射; 光子晶体光纤; 温度; 应变

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20133404.0500

## Temperature and Stress Response of Depolarized Guided Acoustic Brillouin Scattering in Photonic Crystal Fibers

HOU Shang-lin<sup>1\*</sup>, XUE Le-mei<sup>1</sup>, WANG Ju-wei<sup>1</sup>, LIU Yan-jun<sup>1</sup>, WANG Dao-bin<sup>1</sup>, XU Yong-zhao<sup>2</sup>

(1. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Institute of Electronic Engineering, Dong Guan University of Technology, Dongguan 523808, China)

\* Corresponding Author, E-mail: houshanglin@gmail.com

**Abstract:** The dispersion equation of depolarized-guided acoustic wave Brillouin scattering (De-GAWBS) in photonic crystal fiber was numerically solved. The relationship of Brillouin frequency shift with pump wavelength and air hole filling fraction was studied. The dependency of De-GAWBS frequency shift on temperature, tensile strain, acoustic modes, the core diameter of photonic crystal fiber, and the number of air hole layers was investigated. The Brillouin frequency shift decreases linearly with the wavelength increasing, and the transverse velocity of acoustic wave decreases with the increasing of the air hole filling fraction at the same wavelength. The De-GAWBS frequency shift increases linearly with the increasing of temperature and strain. The frequency shift of the higher order torsional-radial mode is more sensitive in the same temperature condition, and the frequency shift of the lower order torsional-radial mode is more sensitive in the same tensile strain condition. The resonance frequency shift increases with the core diameter increasing and decreases with the number of layers of air hole increasing.

**Key words:** depolarized guided acoustic wave; Brillouin scattering; photonic crystal fiber; temperature; tensile strain

收稿日期: 2012-12-24; 修订日期: 2013-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(61167005); 甘肃省自然科学基金(1112RJZA018)资助项目

作者简介: 侯尚林(1970-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要从事光纤通信和传感器件的研究。

E-mail: houshanglin@gmail.com

## 1 引言

光纤中的布里渊散射 ( Brillouin scattering, BS) 过程是指泵浦光场通过电致伸缩效应产生弹性声波场, 并周期性地对介质折射率进行调制而形成运动的光栅, 从而散射泵浦光。按照所产生的斯托克斯光的传输方向, 光纤中的受激布里渊散射 ( Stimulated Brillouin scattering, SBS) 分为前向 BS 和后向 BS, 前向 BS 对后向 BS 有调节作用。前向 BS 又称声波导布里渊散射 ( Guided acoustic wave Brillouin scattering, GAWBS), 可分为极化型 ( Polarized-guided acoustic wave Brillouin scattering, GAWBS) 和去极化型声波导布里渊散射 ( Depolarized-guided acoustic wave Brillouin scattering, De-GAWBS) [1]。光纤中参与 De-GAWBS 的声波主要为  $TR_{2m}$  模式 ( 扭转径向模式), 只沿着光纤横截面传播。

由于 GAWBS 模式的谐振频率对光纤结构以及环境条件较为敏感, 且具有传感灵敏度高、动态范围大、传感距离长、响应时间短等优点, 因此, GAWBS 可应用于传感领域, 测量声波速度、光纤包层直径、环境温度以及应力等。光子晶体光纤 ( Photonic crystal fiber, PCF) 的多孔结构使得 GAWBS 谐振频率对这些参数的测量更为敏感, 提高了测量的灵敏度。极化型以及去极化型 GAWBS 在标准单模光纤以及极化保持光纤中都已得到深入的研究。Shibata 等 [2] 的实验研究表明, 横纵声波波速比随着空气孔面积的增大而减小。Beugnot 等 [3] 通过实验研究了 PCF 中的极化

型 GAWBS, 指出通过调节 PCF 的空气孔包层结构可以使声波基模被有效地限制在纤芯区。P. Dainese 等 [4] 指出, 在空气孔填充率极高的 PCF 中, 在纤芯中将会产生数 GHz 的横向声波模式。Yosuke Tanaka 等 [5-6] 通过实验测量了普通光纤中 De-GAWBS 过程中边带频率的温度系数以及应变系数。

基于本课题组以前的研究工作 [7-11], 本文建立了 PCF 中的 De-GAWBS 色散方程并数值求解, 研究了 PCF 中的布里渊频移随泵浦波长的变化关系, De-GAWBS 频移随温度及应力的响应关系以及 De-GAWBS 声波导模式、PCF 纤芯直径及空气孔层数的关系。结果表明, De-GAWBS 频移随温度及应变的增大而线性增加。高阶  $TR_{2m}$  模式的 De-GAWBS 频移对温度的变化更为敏感。而在同一应变条件下, 低阶  $TR_{2m}$  模式的 De-GAWBS 频移对应变的变化更为敏感, 且有很好的线性度。这些结论为设计新型温度、应力传感器提供了理论参考。

## 2 理论分析

PCF 空气孔填充率可定义为:

$$k = A_h/A, \quad (1)$$

其中  $A_h$  为空气孔总面积,  $A$  为 PCF 横截面总面积。

在 PCF 中, 参与 De-GAWBS 的声波模式主要为  $TR_{2m}$  模式。对于  $TR_{2m}$  声波模式, 在自由边界条件下 ( 无牵引力) 得到  $TR_{2m}$  模式的色散方程 [12]:

$$\begin{vmatrix} \left(3 - \frac{y_m^2}{2}\right)J_2(\alpha y_m) & \left(6 - \frac{y_m^2}{2}\right)J_2(y_m) - 3y_m J_3(y_m) \\ J_2(\alpha y_m) - \alpha y_m J_3(\alpha y_m) & \left(2 - \frac{y_m^2}{2}\right)J_2(y_m) + y_m J_3(y_m) \end{vmatrix} = 0, \quad (2)$$

其中  $\alpha = \frac{V_s}{V_L}$ ,  $V_s$ 、 $V_L$  分别为声波的切向速度和纵向速度, 且一般情况下横波速度小于纵波速度。  $J_2$ 、 $J_3$  分别为二阶和三阶贝塞尔函数。本征值  $y_m$  与切向速度、PCF 包层直径以及前向布里渊频移  $f_m$  ( 即  $m$  阶  $TR_{2m}$  模式的谐振频率) 有关:

$$y_m = \frac{\pi f_m d_{\text{clad}}}{V_s}, \quad (3)$$

纵向速度可通过后向布里渊频移得到:

$$v_B = \frac{2nV_L}{\lambda_p}, \quad (4)$$

由  $\alpha = \frac{V_s}{V_L}$  得

$$y_m = \frac{\pi f_m d_{\text{clad}}}{\alpha V_L}. \quad (5)$$

对于石英光纤, 布里渊频移与温度以及应力的关系被广泛地应用于光纤传感领域。去极化型声波导布里渊散射频率的温度系数为 [13]:

$$\theta = \frac{1}{f_m} \frac{df_m}{dT}, \quad (6)$$

对于石英光纤, 式中  $\theta = 9.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。De-GAWBS 的谐振频率随应变的变化关系为<sup>[6,14]</sup>:

$$\frac{1}{f_m} \frac{df_m}{d\varepsilon} = \frac{1}{y_m} \frac{dy_m}{d\varepsilon} + \frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{d\varepsilon} - k_\varepsilon, \quad (7)$$

式中第一项为:

$$\frac{1}{y_m} \frac{dy_m}{d\varepsilon} = \frac{1}{y_m} \frac{dy_m}{d\alpha} \frac{d\alpha}{d\varepsilon} = \frac{1}{y_m} \frac{dy_m}{d\alpha} \frac{k'_\varepsilon}{\sqrt{8(1-k_\varepsilon)^3(1-2k_\varepsilon)}}, \quad (8)$$

当  $\varepsilon \ll 1$  时,  $E'/E = 5.75$ ,  $k_\varepsilon = 0.14$ ,  $k'_\varepsilon = 3.07$ ,  $1/y_m \cdot dy_m/d\alpha = -0.144$ <sup>[6,15]</sup>。第二项为:

$$\frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{d\varepsilon} = \frac{E'}{2E} - \frac{\rho'}{2P} - \frac{k'_\varepsilon}{2(1+k_\varepsilon)} = \frac{E'}{2E} - \frac{1}{2}(2k_\varepsilon - 1) - \frac{k'_\varepsilon}{2(1+k_\varepsilon)}, \quad (9)$$

“'”表示对  $\varepsilon$  的微分。

### 3 数值模拟及讨论

取石英光纤的典型值  $V_s = 3.764 \text{ km/s}$ ,  $V_L = 5.968 \text{ km/s}$ , 并带入式(2), 得出  $\text{TR}_{2,m}$  模式的不同本征频率  $f_m$ , 如图 1 所示, 各零点为式(1)的数值解。 $y_m$  的数值解为图中曲线与  $y = 0$  轴的交点。

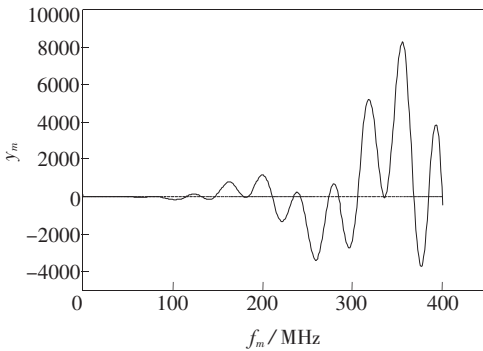


图 1 方程(1)的数值解

Fig. 1 Numerical solution of Equation(1)

根据式(1)和式(4), 我们考查了布里渊频率随泵浦波长及空气孔填充率的变化关系。参考文献[16]选取了两种 PCF, 参数如下:  $\text{PCF}_1$  与  $\text{PCF}_2$  的空气孔填充率、纵横声速比和横向声波速度分别为  $k_1 = 0.018$ ,  $k_2 = 0.03$ ;  $\alpha_1 = 0.592$ ,  $\alpha_2 = 0.576$ ;  $V_{s1} = 3537 \text{ m/s}$ ,  $V_{s2} = 3537 \text{ m/s}$ 。图 2 为布里渊频率随泵浦波长的变化关系。由图 2 可知, 布里渊频移随着波长的增大而线性减小, 相同

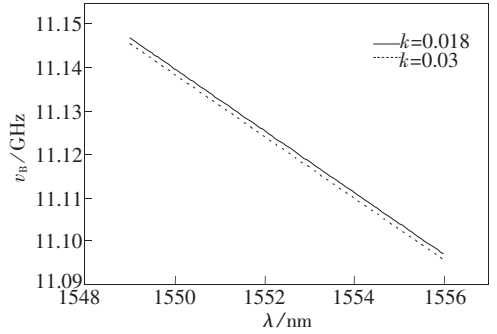


图 2 布里渊频移随入射波长的变化关系

Fig. 2 Brillouin frequency shift vs. wavelength for two PCFs with different air hole filling fraction

的波长点,  $\text{PCF}_1$  的布里渊频率大于  $\text{PCF}_2$ , 且空气孔填充率增大时, 布里渊频移将减小。在  $1550 \text{ nm}$  处,  $\text{PCF}_1$  与  $\text{PCF}_2$  的布里渊频移分别为  $11.14 \text{ GHz}$  和  $11.139 \text{ GHz}$ , 与文献[16]中的实验结论相符。这说明当空气孔填充率增大时, 声波横向速度将会减小。因为空气中声波的横向速度低于石英中声波的横向速度, 所以随着空气孔的增加, 横向声速将会出现减小的趋势。

根据式(6)~(9), 对于不同的  $\text{TR}_{2,m}$  模式, 研究了 De-GAWBS 谐振频移随温度及应变的变化关系。PCF 的参数选取如下(参数来自于文献[17]): 空气孔直径  $d_h = 1.18 \mu\text{m}$ , 空气孔周期  $\Lambda = 2.44 \mu\text{m}$ , 纤芯直径  $d_c = 3.94 \mu\text{m}$ ,  $f_s = 105.5 \text{ MHz}$ ,  $f_7 = 136 \text{ MHz}$ 。PCF 中  $\text{TR}_{2,5}$  模式与  $\text{TR}_{2,7}$  模式的 De-GAWBS 频移随温度及应变的变化关系如图 3 所示。从图中可看出 De-GAWBS 频移随温度及应变的增大而线性增加。同一温度条件下,  $\text{TR}_{2,7}$  模式的频移大于  $\text{TR}_{2,5}$  模式的频移, 即高阶模式的频移对温度的变化更为敏感; 而在同一应变条件下,  $\text{TR}_{2,5}$  模式的频移大于  $\text{TR}_{2,7}$  模式的频移, 即低阶模式的频移对应变的变化更为敏感。因此, 在进行温度传感时, 可选取高阶模式的频移作为测量量; 而在进行应变传感时, 可选取低阶模式的频移量作为测量量。

为了研究 PCF 的纤芯直径对  $\text{TR}_{2,m}$  模式的 De-GAWBS 谐振频移影响, 选取 PCF 的参数如下(参数取自文献[18]): 空气孔直径  $d_h = 2.2 \mu\text{m}$ , 空气孔层数为 6, 纤芯直径分别为  $4.4, 6.4, 8.4 \mu\text{m}$ , 与其相对应的  $\text{TR}_{2,7}$  模式的谐振频率分别为  $121.64, 124.57, 127.27 \text{ MHz}$ 。图 4 为不同纤芯直径下, De-GAWBS 频移随温度及应变的变化关系。

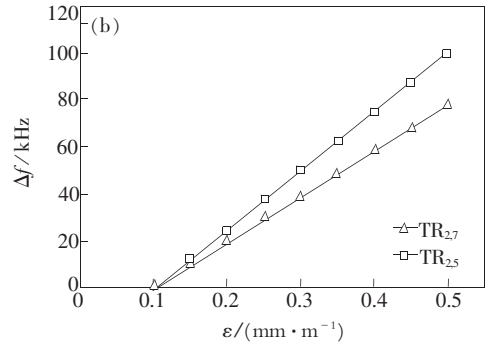
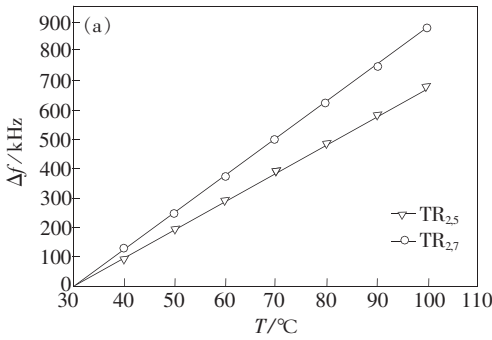


图3 去极化型布利渊散射谐振频移随温度(a)和应力(b)的变化关系

Fig.3 De-GAWBS frequency shift vs. temperature(a) and tensile strain(b)

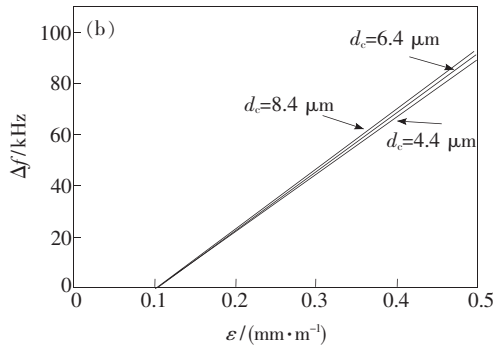
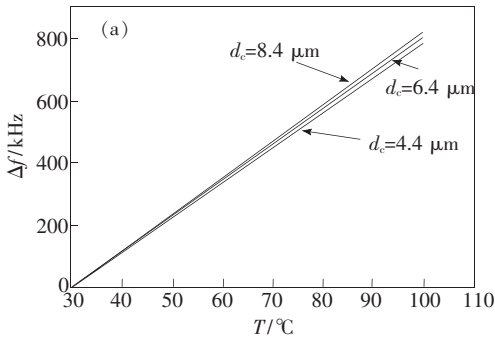


图4 不同纤芯直径下,去极化型声波布利渊散射频移随温度(a)和应力(b)的变化关系。

Fig.4 De-GAWBS frequency shift vs. temperature(a) and tensile strain(b) for different core diameters

从图中可看出,De-GAWBS 频移随温度及应变线性增加,且都随着纤芯直径的增大而增加,即具有较大纤芯直径的 PCF,其 De-GAWBS 频移对温度以及应变的响应都更为敏感。

为了进一步研究 PCF 的空气孔层数对 TR<sub>2m</sub> 模式的 De-GAWBS 谐振频移影响,选取 PCF 的参数如下(参数取自文献[18]):空气孔直径 d<sub>h</sub> = 1.15 μm,空气孔周期 Λ = 2.44 μm,空气孔层数分别为 2,4,6,与其对应的 TR<sub>2,7</sub> 模式的谐振频率分别为 135.89,130.76,127.81 MHz。图 5 为不同空气孔层数下,De-GAWBS 频移随温度及应变的变化关系。从图中可看出,De-GAWBS 频移随温度及应变线性增加,且都随空气孔层数的增加而减小,即具有较少空气孔层数的 PCF,其 De-GAWBS 频移对温度及应变的响应更为敏感。

由图 4 和图 5 可以看出,具有较大纤芯直径以及较少空气孔层数的 PCF,其 De-GAWBS 频移对温度及应变的响应更为敏感。因为在 De-GAWBS 过程中,环境温度及应变的变化会造成光纤折射率的变化,而折射率改变幅度可通过测量 De-GAWBS 频移得到。在 PCF 中,石英纤芯和

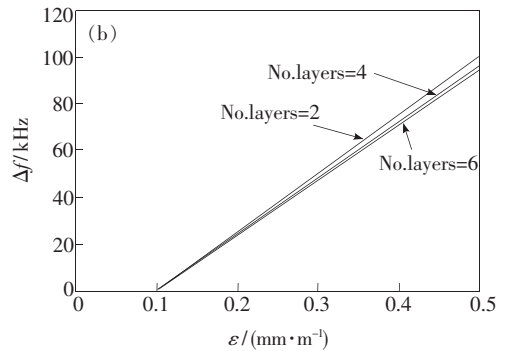
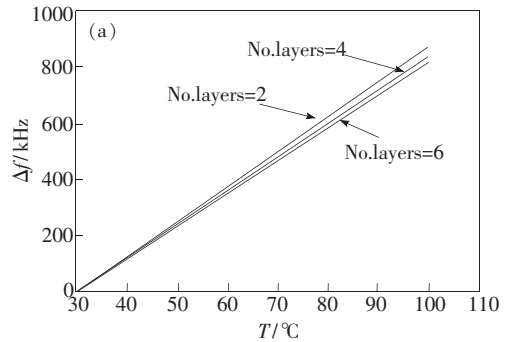


图5 不同空气孔层数下,去极化型声波布利渊散射频移随温度(a)和应力(b)的变化关系。

Fig.5 De-GAWBS frequency shift vs. temperature(a) and tensile strain(b) for different air hole layer numbers

空气孔包层对温度及应变的响应程度不同,在温度及应变作用下,空气孔折射率的变化远小于石英纤芯折射率的变化,即前者所产生的 De-GAWBS 频移远小于后者<sup>[19]</sup>。

## 4 结 论

对 PCF 中的 GAWBS 散射方程进行了数值求解。针对该模型,研究了不同空气孔填充率的 PCF 中的布里渊频移随泵浦波长的变化关系,De-GAWBS 频移随温度及应变的响应关系以及与  $TR_{2m}$  模式、PCF 纤芯直径及空气孔层数的关系。结果表明:在 PCF 中,布里渊频移随着波长的增

大而线性减小,且在同一波长下,增大 PCF 空气孔填充率将使声波横向速度减小。De-GAWBS 频移随温度及应变的增大而线性增加,在同一温度下,高阶  $TR_{2m}$  模式的 De-GAWBS 频移较低阶  $TR_{2m}$  模式的要大,即高阶  $TR_{2m}$  模式的 De-GAWBS 频移对温度的变化更为敏感;在同一应变条件下,低阶  $TR_{2m}$  模式的 De-GAWBS 频移对应变的变化更为敏感。De-GAWBS 频移随纤芯直径的增大而增加,随空气孔层数的增加而减小。本文的研究为在实际应用中如何进行 PCF 的最优化设计来达到更为灵敏的 De-GAWBS 的温度及应变传感提供了一定的理论依据。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Elser D, Andersen U L, Korn A, *et al.* Reduction of guided acoustic wave Brillouin scattering in photonic crystal fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97(13):133901-1-4.
- [ 2 ] Shibata N, Nakazono A, Taguchi N. Forward Brillouin scattering in holey fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18(2):412-414.
- [ 3 ] Beugnot J C, Sylvestre T, Maillotte H, *et al.* Guided acoustic wave Brillouin scattering in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(1):17-19.
- [ 4 ] Dainese P, Russell P, Joly N, *et al.* Stimulated Brillouin scattering from multi-GHz-guided acoustic phonons in nanostructured photonic crystal fibres [J]. *Nature Phys.*, 2006, 2:388-392.
- [ 5 ] Tanaka Y, Ogusu K. Temperature coefficient of sideband frequencies produced by depolarized guided acoustic-wave Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10(12):1769-1771.
- [ 6 ] Tanaka Y, Ogusu K. Tensile-strain coefficient of resonance frequency of depolarized guided acoustic wave Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(7):865-867.
- [ 7 ] Hou S L, Zhang S J, Li S P, *et al.* Investigation on transmission characteristics of doubly cladding fiber with an inner cladding made of negative refractive-index material [J]. *Acta Opt. Sinica (光学学报)*, 2011, 31(5):0506004-1-6 (in Chinese).
- [ 8 ] Hou S L, Li H B, Li S P, *et al.* Influence of stokes pulse shapes on SBS slow light in fibers [J]. *Acta Opt. Sinica (光学学报)*, 2011, 31(6):0606008-1-5 (in Chinese).
- [ 9 ] Hou S L, Xue L M, Li S P, *et al.* Study on characteristics of acoustic modes *via* stimulated Brillouin scattering in photonic crystal fiber [J]. *Acta Phys. Sinica (物理学报)*, 2012, 61(13):134205-1-5 (in Chinese).
- [ 10 ] Hou S L, Han J W, Zhu P, *et al.* A novel design of a dual-core photonic crystal fiber for broadband dispersion compensation with low nonlinearity [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2010, 31(3):449-453 (in Chinese).
- [ 11 ] Hou S L, Han J W, Qiang Z J, *et al.* The dispersive and nonlinear properties of photonic crystal fibers with modified honeycomb lattice structure [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2011, 32(2):179-183 (in Chinese).
- [ 12 ] Shelby R, Levenson M, Bayer P. Guided acoustic-wave Brillouin scattering [J]. *Phys. Rev. B*, 1985, 31(8):5244-5252.
- [ 13 ] Carry E, Beugnot J C, Stiller B, *et al.* Temperature coefficient of the high-frequency guided acoustic mode in a photonic crystal fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(35):6543-6547.
- [ 14 ] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, 1(5):107-108.
- [ 15 ] Mallinder F P, Proctor B A. Elastic constants of fused silica as a function of large tensile strain [J]. *Phys. Chem. Glasses*, 1964, 5(4):91-103.

- [16] Shibata N, Nakazono A, Taguchi N, *et al.* Forward Brillouin scattering in holey fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18(2):412-414.
- [17] John E M, Radha K P, Toulouse J. Depolarized guided acoustic wave Brillouin scattering in photonic crystal fibers [C]// Photonic Crystal Fiber (CMW) Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference. Baltimore: OSA, 2009:1-2.
- [18] John E M, Radha K P, Toulouse J. Dependence of frequency shift of depolarized guided acoustic wave Brillouin scattering in photonic crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, 29(2):200-208.
- [19] Yu X L, Luo Y X, Song M C. Influence of temperature field on the solid-core photonic crystal fibers [J]. *Chin. J. Quantum Elect.* (量子电子学报), 2007, 24(6):768-774 (in Chinese).

## 《中国光学》征稿启事

《中国光学》,双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN22-1400/04;国内外公开发行人,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- ★中国科技核心期刊
- ★中国光学学会会刊
- ★中国学术期刊(光盘版)源期刊
- ★万方数字化期刊全文数据库源期刊
- ★中国科技期刊数据库源期刊
- ★荷兰 Scopus 数据库源期刊
- ★美国《化学文摘》(CA)源期刊
- ★美国乌利希国际期刊指南(Ulrich LPD)源期刊
- ★俄罗斯《文摘杂志》(AJ)源期刊
- ★波兰《哥白尼索引》(IC)源期刊

**报道内容:**基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

**发稿类型:**学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿,洽谈合作。

**主管单位:**中国科学院

**主办单位:**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

**编辑出版:**《中国光学》编辑部

**投稿网址:**<http://www.chineseoptics.net.cn>

**邮件地址:**[chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn), [zgxcn@126.com](mailto:zgxcn@126.com)

**联系电话:**(0431)86176852; (0431)84627061      **传 真:**(0431)84613409

**编辑部地址:**长春市东南湖大路3888号(130033)