

基于 SBS 的填充液体的光子晶体光纤温度传感器

李红兵 金艳云* 方靖淮 施建珍 崔荣华

(南通大学理学院, 江苏 南通 226007)

摘要 传统的光纤分布式温度传感器存在精度不高和设备昂贵的缺点。设计了新型的基于受激布里渊散射(SBS)的分布式温度传感器,通过将乙醇填充到光子晶体光纤中,利用乙醇的折射率随温度变化的特性,光子晶体光纤的有效面积也随之变化,使得光纤输出功率随着温度的变化而变化;数值求解基于光纤的SBS耦合方程组,获得输出功率和温度的变化关系,从而验证了新的传感机制的可行性。基于新设计,要达到1℃的分辨率,功率测量设备的动态测量范围只需要达到40 dB,远小于传统测量系统中频率测量设备的80 dB。同时还对该系统中可能存在的一些影响因素进行了分析。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;分布式温度传感器;受激布里渊散射

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.120602

Temperature Sensing of Photonic Crystal Fiber Filled with Liquid via SBS

Li Hongbing Jin Yanyun Fang Jinghuai Shi Jianzhen Cui Ronghua

(School of Science, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China)

Abstract The traditional fiber distributed temperature sensor has the shortcoming of low precision and expensive equipments. New distributed temperature sensor based on stimulated Brillouin scattering (SBS) is designed by filling alcohol in photonic crystal fiber (PCF). Since the refractive index of alcohol varies with temperature, which results in the effective mode area of PCF varying with temperature, the output power of pulse in fiber varies with temperature. The coupled amplitude equations of SBS in optical fiber are solved numerically. And the relations between output power and temperature are obtained. The possibility of new sensing mechanism is proved. In order to achieve a precision of 1 °C for the new design, the dynamic range of power measurement equipment is only 40 dB, which is far less than that of frequency measurement equipment in traditional measurement system. Some influence factors in the new system are also analyzed.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; distributed temperature sensor, stimulate Brillouin scattering

OCIS codes 060.4370; 190.4370; 290.5900

1 引言

自从 Horiguchi 等^[1,2]首次将光纤中的布里渊散射效应用于分布式温度和应变测量以来,基于布里渊散射的全分布式光纤传感器以其能在连续的空间进行测量而成为国内外研究的热点,在实验和理论上取得了大量成果^[3~7]。与传统的温度传感器相比,它具有体积小、防腐蚀、耐高温、抗电磁干扰、安全性高、长距离分布式测量等优点。但自发布里渊散射斯托克斯光非常弱,需要采取昂贵的弱信号处理系统,同时还存在着温度精度和空间分辨率不够高的缺陷。

收稿日期: 2012-08-16; **收到修改稿日期**: 2012-10-09; **网络出版日期**: 2012-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(30970754)、南通市应用研究项目(K2010059)和南通大学自然科学基金(03041077) 资助课题。

作者简介: 李红兵(1979—),男,硕士,实验师,主要从事新型光纤与光传感技术、光子晶体光纤技术等方面的研究。

E-mail: njulhb@ntu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: xiaoxiangoo@ntu.edu.cn

1987年被提出的光子晶体^[8]有着许多在传统光纤中难以实现的特性,如可控非线性、良好的色散特性、弯曲损耗小等^[9~11],受到了人们的广泛关注。在光子晶体光纤(PCF)中填充高折射率温度系数的液体材料,改变光纤包层的等效折射率,利用温度变化导致的传输特性变化,即可构成折射率型光纤温度传感器。

传统的纯石英单模光纤由于其布里渊频移随温度的变化系数较小,所以温度精度难以提高,且需要干涉仪和频谱仪等昂贵设备。本文设想通过在光子晶体光纤中填充乙醇,设计出一种具有较高温度系数的高非线性光纤,以此光纤为传输介质,通过测量一定条件下的受激布里渊散射(SBS)作用后输出斯托克斯光的延时和功率来确定温度,提高测量精度。

2 传感器原理

2.1 光子晶体光纤

光子晶体光纤分为全内反射型光子晶体光纤和光子带隙型光子晶体光纤。典型的全内反射型光子晶体光纤其纤芯是实心的,包层为多孔结构。本文所采用光纤为全内反射型光子晶体光纤,其截面图如图1所示,截面由六边形分布的四层空气孔组成, $d_1 \sim d_4$ 依次是由纤芯向外1~4层空气孔的直径, Λ 是孔节距,根据设计需要,可对上述5个参量进行调节。

2.2 温度传感机制

由于乙醇的折射率随温度变化的系数比较大,故用液体乙醇填充上述4层设计的包层孔。乙醇温度系数 $\alpha_{\text{ethanol}} = 3.94 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,而石英的温度系数为 $\alpha_{\text{SiO}_2} = 8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,石英的温度系数比乙醇的温度系数低2个数量级,相对于乙醇,石英折射率变化可以忽略。温度的变化将导致乙醇折射率的变化,最终影响到光纤有效面积的变化。

将该光纤用于分布式温度测量的原理如图2所示。用光子晶体光纤作为测试光纤,从分布反馈式激光二极管(DFB-LD)光源发出的光输入到一个电光调制器(EOM)以产生两个一阶边频,其频率间隔在光子晶体光纤的布里渊频移附近可调,频率较低的边频被窄带光纤布拉格光栅(FBG)反射经快速光门变成周期为 $2T_0$ 的周期性脉冲光;频率较高的边频则经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大,通过可调衰减器(VOA)控制其光功率,然后经过快速光门变成一个宽度为 T_0 的单脉冲作为抽运光。通过掺铒光纤放大器长度控制时延,使得斯托克斯光先于抽运光到达测试光纤的另一端,则在光纤从右到左的位置上相继发生SBS过程,通过数字示波器来测量探测脉冲的到达时间和功率。工作时,首先判断收到的脉冲序列的功率情况,如果功率高

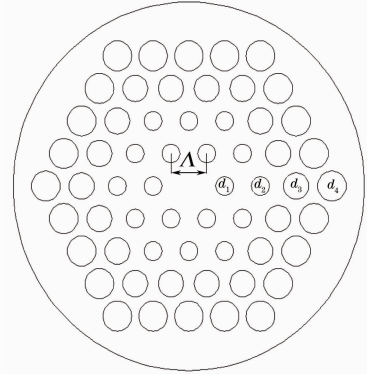


图1 光子晶体光纤截面图

Fig.1 Cross section of photonic crystal fiber

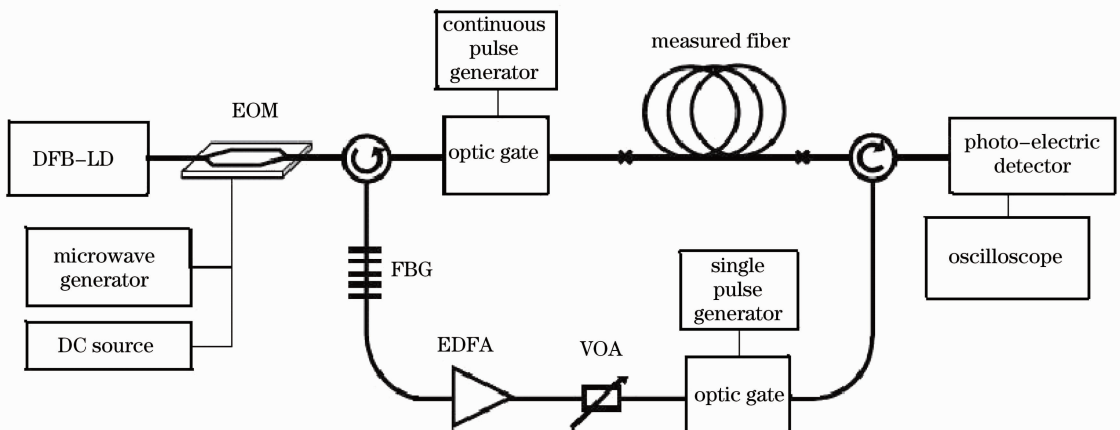


图2 分布式温度测量的实验装置原理图

Fig.2 Experimental setup of distributed temperature measurement

于初始探测脉冲的功率,说明该脉冲经历了 SBS 过程,通过程序计算相应的温度,根据该脉冲到达的时间确定该温度的位置;否则说明该脉冲未经历 SBS 过程,对温度测量没有贡献。考虑到 SBS 频移会随着温度有微小的变化,在温度变化范围比较大时,对输入抽运光的频率进行适当调整,获得最佳 SBS 过程,从而可以获得所有温度区间的温度分布。

2.3 SBS 耦合振幅方程数值求解

由于光主要在纤芯中传播,在纤芯直径大于光波波长的条件下,普通单模光纤的 SBS 耦合振幅方程也近似适用于全内反射结构的光子晶体光纤,其方程组如下^[12,13]:

$$-\frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{n_g}{c} \frac{\partial E_p}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} E_p + i \frac{\gamma_e \omega_p}{2n_g c \rho_0} E_s \rho, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{n_g}{c} \frac{\partial E_s}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} E_s + i \frac{\gamma_e \omega_p}{2n_g c \rho_0} E_p \rho^*, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + (\Gamma_B - 2i\Omega) \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\Omega_B^2 - \Omega^2 - iT_B \Omega) \rho = \frac{\gamma_e q^2 \epsilon_0}{4} E_p E_s^*, \quad (3)$$

式中 E_p 和 E_s 为抽运波和斯托克斯波慢变包络的归一化电场幅度, ρ 为光纤的密度, ρ_0 为光纤的固有密度, ω_p 和 Ω 分别为抽运波和声波的角频率, n_g 为光在光纤中的群折射率, c 为光在真空中的传播速度, ϵ_0 为真空中的介电常数, α 和 γ_e 为衰减系数和电致伸缩系数, $+$ ($-$) z 方向为斯托克斯光(抽运光)传播方向, Γ_B 为布里渊增益谱的半峰全宽(FWHM),其大小与声子寿命 T_B 有关, $\Gamma_B = \frac{1}{T_B}$, Ω_B 为布里渊频移。

$$I_{p(s)} = E_{p(s)}^2, \quad (4)$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^4 dx dy}, \quad (5)$$

$$P_{p(s)} = A_{\text{eff}} I_{p(s)}, \quad (6)$$

式中 $I_{p(s)}$ 为抽运光(斯托克斯光)的归一化强度, A_{eff} 为光纤有效面积, $F(x, y)$ 为光纤基模的场分布函数, $P_{p(s)}$ 为抽运光(斯托克斯光)的功率。

在数值计算过程中,通过慢变包络近似,首先在某一时刻通过傅里叶变换和反傅里叶变换对(3)式进行求解,得出该时刻 ρ 的值^[14],对(1)、(2)式采取特征线法将其化为单变量的偏微分方程,代入先前所计算的 ρ 值,采用四阶龙格-库达法计算出下一时刻所有位置的 E_p 和 E_s 的值,把这组值作为下一时刻计算 ρ 的初值,如此反复,最后得到输出的斯托克斯波形,从而获得光的功率、时间延迟及脉冲展宽因子^[15]。其中时间延迟定义为发生与不发生 SBS 时输出斯托克斯波的峰值时刻的时间差,脉冲展宽因子 B 定义为输出的斯托克斯波的 FWHM 与输入斯托克斯波的 FWHM 之比。

用 P_{SoutH} 和 P_{SoutL} 分别代表高温时和低温时的斯托克斯脉冲输出功率, T_H 和 T_L 分别代表高低温度;定义输出相对功率的温度系数 C_{RPT} 为

$$C_{\text{RPT}} = \frac{P_{\text{SoutH}} - P_{\text{SoutL}}}{P_{\text{SoutL}}(T_H - T_L)}, \quad (7)$$

3 数值模拟结果

3.1 光纤有效面积数值计算

对于图 1 所示结构的光子晶体光纤,为了获取同样温差下比较大的有效面积变化,利用 Rsoft 软件进行数值计算^[16]。由于最内层空气孔对光纤有效面积的影响最大,所以先对 d_1 在 $0.1\Lambda \sim 0.9\Lambda$ 之间进行数值模拟,确定 $d_1 = 0.6\Lambda$ 时光纤有效面积随温度的变化最大;同样地,依次对 d_2, d_3, d_4 进行研究。最终选取这样一组参数: $\Lambda = 2.75 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.6\Lambda$, $d_2 = 0.4\Lambda$, $d_3 = 0.8\Lambda$, $d_4 = 0.9\Lambda$ 。入射斯托克斯光波长为 $1.55 \mu\text{m}$,取纤芯的折射率为 1.45,乙醇在 20°C 时的折射率为 1.36048,通过 Rsoft 软件计算出该光子晶体光纤在不

同温度下的有效面积,如图3所示。当温度从 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光纤的有效面积从 $14.687\text{ }\mu\text{m}^2$ 增加到 $44.624\text{ }\mu\text{m}^2$,且温度越高,有效面积变化越快。

3.2 输出斯托克斯光的数值计算

选取输入斯托克斯脉冲为连续周期信号,占空比为1:1,脉冲为超高斯形状,其FWHM为10 ns,周期为20 ns,峰值功率为 $10\text{ }\mu\text{W}$;输入抽运光为单个脉冲,具有超高斯形状,其FWHM也为10 ns,峰值功率为1 W。由于斯托克斯脉冲的FWHM为10 ns,故空间分辨率能达到2 m。为了提高时域和空间域的精度,设定光纤的长度为2.069 m,即正常情况下,激光通过该段光纤的时间为10 ns。当温度从 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,数值计算输出斯托克斯波信号的峰值功率如图4所示,时间延时和脉冲展宽因子如图5所示。数值计算时间上的精度为0.004 ns,空间上的精度为0.8 mm。从图4可以发现,当温度从 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,输出斯托克斯脉冲的功率从 $31.72\text{ }\mu\text{W}$ 变化到 $15.15\text{ }\mu\text{W}$,即输出相对功率的温度系数为 0.01094 K^{-1} ,这也就意味着要达到 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的分辨率,功率测量设备的动态测量范围至少要达到40 dB,这与自发布里渊散射检测频率要达到80 dB的要求相比还是提高了不少。如此显著变化的主要原因是光纤有效面积的变化导致了光纤光强的变化,从而影响了输出斯托克斯功率。从图5可以发现延时和脉冲展宽因子随温度的变化不大,在数值计算的温度范围内,仅分别变化了0.31 ns和0.041,这对区分相邻的两个脉冲没有什么影响。

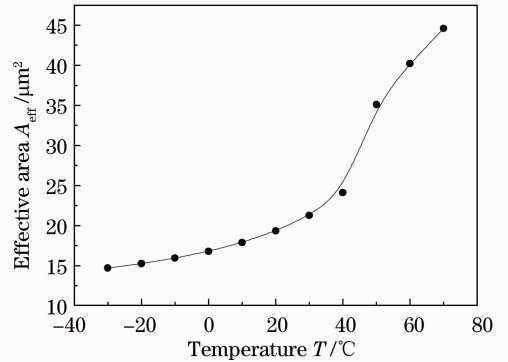


图3 有效面积与温度的关系

Fig. 3 Effective area versus temperature

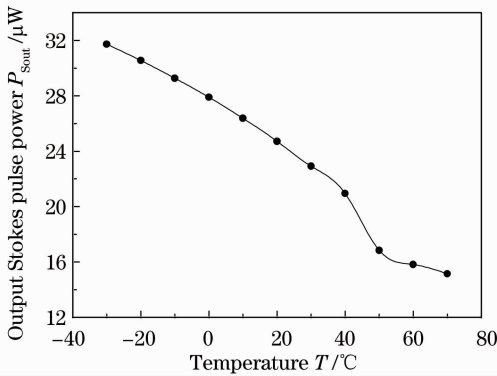


图4 输出斯托克斯功率与温度的关系

Fig. 4 Output Stokes pulse power versus temperature

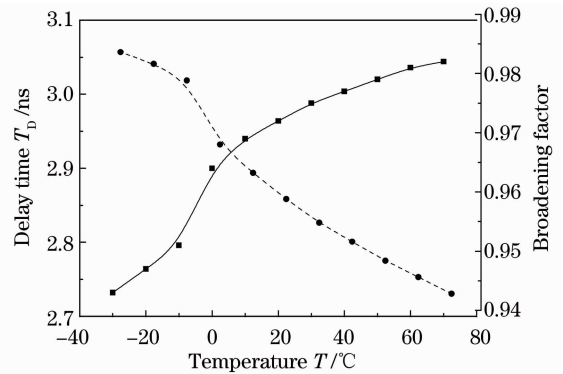


图5 输出斯托克斯延时和脉冲展宽因子与温度的关系

Fig. 5 Time delay and broadening factor versus temperature

4 系统设计中的其他影响因素

上节中所计算的斯托克斯输出功率只是理想状况下的结果。斯托克斯输出功率会受到各方面的影响,这些影响因素都会给测量系统带来不小的误差,在设计过程中必须加以考虑。

1) 输入斯托克斯功率要求恒定,这直接影响着输出斯托克斯功率,因此需要配置高精度稳压电源系统来保证外界的电压干扰不会影响到输入斯托克斯功率。

2) 由于铺设光纤时的光纤弯曲带来的弯曲损耗,解决办法就是尽可能地增加弯曲半径,减小弯曲损耗。特殊情况下可以对设备进行校正,将弯曲损耗的情况考虑进去。

3) 各个元器件的连接损耗,这可以通过对实际仪器的测量加以校正。

4) 抽运光的消耗。由于我们的设计是在整个光纤长度上只有一个抽运脉冲与一系列的斯托克斯脉冲及声波场发生相互作用,因而抽运光的能量会有部分损耗,并不是上述数值计算过程中的恒定值。解决方案是:由于在每个脉冲周期内抽运光的损耗很小,数值模拟显示大约光纤长度每增加200 m,抽运光功率会下

降1%，因而在光纤长度比较短的时候可以忽略不计，或者可以在条件允许范围内降低斯托克斯脉冲的功率并提高抽运光功率；当需要更高精度时，在数值计算中要考虑抽运光消耗对结果的影响。

5) 当光子晶体光纤的纤芯直径小于 $1.55 \mu\text{m}$ 时，SBS 将会很明显地出现 3 个布里渊增益谱，间隔为几百兆赫兹，增益系数也小于传统的单模光纤。这就要求我们设计的光子晶体光纤的有效面积不能太小，或者在测量的过程中合理选择抽运光的频率扫描范围，因为 100°C 的温度变化导致的布里渊频移变化大约为 120 MHz，小于上述 3 个增益谱的间隔。

6) 光子晶体光纤制作工艺的限制，比如空气孔非圆形、填充的乙醇中有气泡等。进一步提高光子晶体光纤制作工艺，有些情形可以通过对系统的校正来消除影响。

5 结 论

设计了基于 SBS 的填充乙醇的光子晶体光纤温度传感器。通过数值计算，发现可以利用输出斯托克斯脉冲的功率来传递温度信息，且具有很高的分辨率。由于条件限制，未能进行相关实验，且光功率的精确测量还存在一定难度，实际系统还有一些因素会影响输出斯托克斯光功率，譬如弯曲损耗、限制损耗以及不同设备间的连接损耗等，这其中大部分的影响因素可以通过对具体系统的校正来解决。理论上的计算，肯定了利用液体填充的光子晶体光纤作为分布式温度传感器的可能性。

参 考 文 献

- 1 T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(5): 107~108
- 2 D. Culverhouse, F. Farahi, C. N. Pannel *et al.*. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(14): 913~915
- 3 X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1340~1348
- 4 Chen Weimin, Huang Minshuang, Zou Jian *et al.*. Fiber optic strain sensing technology with Brillouin back scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6): 728~732
陈伟民, 黄民双, 邹建等. 一种利用布里渊散射的光纤应变传感新方法 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(6): 728~732
- 5 Song Muping, Fan Shengli, Chen Hao *et al.*. Study on the technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on optical interferometric heterodyne detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **32**(2): 233~236
宋牟平, 范胜利, 陈好等. 基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 的研究 [J]. *光子学报*, 2005, **32**(2): 233~236
- 6 M. A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale. Enhanced simultaneous distributed strain and temperature fiber sensor employing spontaneous Brillouin scattering and optical pulse coding [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(7): 450~452
- 7 Song Muping, Qiu Chao. Long-distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 954~958
宋牟平, 裘超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 954~958
- 8 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 9 Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Li Yuan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow light in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2437~2440
赵军发, 杨秀峰, 李元等. 光子晶体光纤中受激布里渊散射慢光研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2437~2440
- 10 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900139
- 11 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010
王丹, 郑义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806010
- 12 V. P. Kalosha, L. Chen, X. Y Bao. Slow light of subnanosecond pulses via stimulated Brillouin scattering in nonuniform fibers [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 021802

- 13 V. P. Kalosha, L. Chen, X. Y Bao. Slow and fast light via SBS in optical fibers for short pulses and broadband pump [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(26): 12693~12703
- 14 I. Velchev, D. Neshev, W. Hogervorst *et al.*. Pulse compression to the subphonon lifetime region by half-cycle gain in transient stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(12): 1812~1816
- 15 Hou Shanglin, Li Hongbing, Li Suoping *et al.*. Influence of Stokes pulse shapes on SBS slow light in fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0606008
侯尚林, 李红兵, 黎锁平等. 斯托克斯脉冲波形对光纤中受激布里渊散射慢光的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0606008
- 16 Li Hongbing. Study on Slow Light and Temperature Sensing Via Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011
李红兵. 基于光纤受激布里渊散射的慢光及温度传感的研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2011