

## 不同封装光纤低温测温性能研究

周考<sup>1</sup>, 石晶<sup>1</sup>, 吴子辰<sup>2</sup>, 胡子桁<sup>2</sup>, 章斌<sup>2</sup>, 汪伟<sup>2</sup>, 任丽<sup>1†</sup>

1. 华中科技大学, 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 深圳供电局有限公司, 广东深圳 518001

收稿日期: 2019-06-27; 接收日期: 2019-10-18

**【摘要】** 基于拉曼散射的分布式光纤温度传感器由于具有抗电磁干扰、耐高压、可连续测温等优点, 在超导电缆及相关超导电力装置中具有潜在应用场景. 在超导电缆低温运行环境中, 常规光纤封装材料耐低温性能差, 其收缩变形会降低光纤测温性能甚至破坏光纤结构. 本文对低温下不同封装光纤测温性能展开研究, 选择四种光纤样品, 在 77 ~ 287 K 温度区间内对其进行了稳态和动态温度测量实验, 分析了低温下不同封装材料、结构和厚度等因素对光纤测温性能的影响, 给出了适用于液氮低温测温的光纤封装材料和结构, 实验验证了聚烯烃紧套光纤在时间和空间上连续测温的可行性.

**关键词:** 耐低温光纤, 封装材料, 光纤测温, 拉曼比值

**PACS:** 42. 81. -i, 42. 81. Cn, 84. 71. Fk, 84. 71. Mn

**DOI:** 10. 13380/j. ltpl. 2019. 04. 010

## Study on Temperature Measurement Performance of Different Packaged Optical Fibers at Low Temperature

ZHOU Kao<sup>1</sup>, SHI Jing<sup>1</sup>, WU Zichen<sup>2</sup>, HU Ziheng<sup>2</sup>,  
ZHANG Bin<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, Ren Li<sup>1†</sup>

1. *Statekey Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology*,

*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;*

2. *Shenzhen Power Supply Bureau Co., Shenzhen 518001, China*

Received date: 2019-06-27; accepted date: 2019-10-18

**【Abstract】** Raman scattering-based distributed optical fiber temperature sensor is expected to be used for superconducting cable cryogenic cooling process and temperature distribution monitoring along the line due to its advantages of anti-electromagnetic interference, high voltage resistance and continuous temperature measurement. However, in low temperature, low temperature resistant packaging material can reduce fiber temperature measurement performance and even damage fiber structure. In this paper, four different packaged optical fibers were used as experimental samples for study on temperature measurement performance at low temperature. The effects of different packaging materials, structures and thicknesses on the temperature measurement performance of optical fiber at low temperature were analyzed. Low smoke zero halogen-polyolefin (LSZH-PO) tight-buffered optical fiber can be used for superconducting cable cryogenic cooling process and temperature distribution monitoring along the line, and the reliability of temperature measurement for LSZH-PO tight-buffered optical fiber was verified

\* 国家自然科学基金项目(51707074)、深圳供电局有限公司科技项目(090000KK52170171)资助的课题.

† E-mail: renli@hust.edu.cn

by experiment.

**Keywords:** Low temperature resistance fiber, Packaging material, Fiber temperature measurement, Raman ratio

**PACS:** 7460,7490,0290

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.04.010

**Reference method:** ZHOU Kao, SHI Jing, WU Zichen, HU Ziheng, ZHANG Bin, WANG Wei, Ren Li, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0308 (2019)

## 1 引言

高温超导电缆具有传输容量大、结构紧凑、损耗低、无电磁污染等优点<sup>[1]</sup>,在提升电网传输容量、升级现有电力系统容量等方面具有潜在应用前景.近十几年来,国内外对高温超导电缆的研发已经取得了巨大进展,相继建成了多组超导电缆示范性工程<sup>[2]</sup>.但是,高温超导电缆由于过电流、局部热扰动等因素容易发生失超故障、失去超导特性,进而对输电系统造成损害甚至影响电网运行.因此,失超检测技术是超导电缆保护系统的关键技术之一,其检测的可靠与准确性对高温超导电缆的安全运行十分重要.

目前,国内外采用的失超检测技术主要基于电压检测和温升检测<sup>[3]</sup>.温升检测一般采用热电偶或铂电阻等温度传感器测量,存在无法沿电缆本体布置、不能用于较高电压等级、易受电磁干扰等弊端,也无法确定电缆沿线失超点位置.使用基于拉曼散射的分布式光纤测温法有望解决上述问题,该方法具有耐高压、抗电磁干扰、光纤尺寸小、可连续测量电缆沿线温度分布等优点.

文献<sup>[4,5]</sup>验证了基于拉曼散射的分布式测温光纤在液氮温区测量高温超导磁体温度的可行性,文献<sup>[6]</sup>验证了分布式测温光纤监测超导电缆低温冷却过程的可行性.但是,上述研究中所用光纤均是未封装的裸光纤,裸光纤纤细、易折断,电网实际应用中需增加封装以提高强度.

目前,国内外测温光纤的封装工艺研究大多集中在封装光纤耐高温性能对其测温性能的影响领域<sup>[7-10]</sup>,在 77 K 环境中不同封装光纤测温性能的研究鲜见报道.

本文对四种不同封装测温光纤在 77~287 K 温区的测温性能开展研究,对比分析了光纤封装材料、结构和厚度对四种光纤测温精度和温度灵敏度的影响,给出了耐低温性能和测温性能较好的光纤,验证了该光纤用于高温超导电缆低温冷却过程及其沿线温度分布监测的可行性.

## 2 分布式光纤测温原理

分布式光纤测温设备主要包括测温主机和光纤两部分.其测温原理是:基于拉曼散射<sup>[11]</sup>的光纤测温主机向测温光纤发射光脉冲信号,光信号在光纤内部产生背向拉曼散射光后,被测温主机重新接收.

随后,测温主机将拉曼比值  $R(z, T)$ <sup>[12]</sup>解调为温度值,并通过光时域反射(Optical Time Domain Reflection, OTDR)技术<sup>[13]</sup>对光纤沿线温度测量点位置进行定位.其中,拉曼比值为拉曼散射光中的反斯托克斯(Anti-Stokes)散射光与斯托克斯(Stokes)散射光强度之比,如式(1).由于 Anti-Stokes 散射光和 Stokes 散射光对温度变化十分敏感,故可通过  $R(z, T)$ 的大小来解调出温度信息,如式(2).

$$R(z, T) = \frac{I_{as}(z, T)}{I_s(z, T)} \quad (1)$$

$$T = \left[ \frac{1}{T_0} - \frac{k}{hc\nu} \ln \left( \frac{R(z, T)}{R(T_0)} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

式中, $z$ 为光纤沿线温度点的位置, $T$ 为温度值, $I_{as}(z, T)$ 、 $I_s(z, T)$ 分别为 Anti-Stokes 散射光和 Stokes 散射光的光强, $h$ 为普朗克常量, $c$ 为光速, $\nu$ 为拉曼频移, $k$ 为玻尔兹曼常数, $T_0$ 为参考温度.

## 3 实验

### 3.1 测温光纤及规格

本文光纤样品来自于北京希卓技术有限公司在美国 MIO 公司所产聚酰亚胺(Polyimide, PI)涂敷、50/125  $\mu\text{m}$  多模光纤基础上加工后的四种不同封装光纤,分别为 0.9 mm 聚烯烃(Low Smoke Zero Halogen-Polyolefin, LSZH-PO)紧套光纤、0.9 mm 铁氟龙(Ethylene-Tetra-Fluoro-Ethylene, ETFE)紧套光纤、0.9 mm ETFE 松套光纤和 3.3 mm 不锈钢(Stainless Steel 316, SS316)光纤.具体规格参数见表 1.

表 1 测温光纤规格参数

编号	LSZH-PO	ETFE 紧套	ETFE 松套	SS316
涂敷材料	PI	PI	PI	PI
封装材料	LSZH-PO	ETFE	ETFE	SS316
密封胶	LSZH-PO	ETFE	无	无
直径(mm)	0.9	0.9	0.9	3.3
导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.42	0.27	0.27	7.92
膨胀系数 ( $\times 10^{-4}/\text{K}$ )	1.1~1.6	1.0~2.0	1.0~2.0	0.13

### 3.2 分布式光纤测温实验平台

为了对上述 4 种不同封装光纤在低温下的测温性能进行研究,搭建了如图 1 所示的分布式光纤测

温实验平台. 实验平台主要包括测温主机、测温光纤和被测对象. 其中, 具有 I/O 通道的测温主机可将光信号解调为温度信号. 本文中使用的测温主机为山旭光电所产的 DTS8000 分布式光纤测温主机, 其规格参数为: 激光器输出功率 17 mW, 空间分辨率 2 m, 时间分辨率 1 s, 温度分辨率 0.1 K, 光纤接口为 50/125  $\mu\text{m}$  接口; 测温光纤为四种不同封装的聚酰亚胺涂敷 50/125  $\mu\text{m}$  多模光纤; 测温对象为高 4 cm、直径 10 cm 的紫铜柱, 柱体表面缠绕光纤进行温度测量实验; 紫铜柱上(距离光纤接口 45 m 位置处)贴有 PT100 铂电阻温度传感器, 其测温范围为 73~900 K, 测温精度可达 0.1 K, 用于检验光纤测温精度.

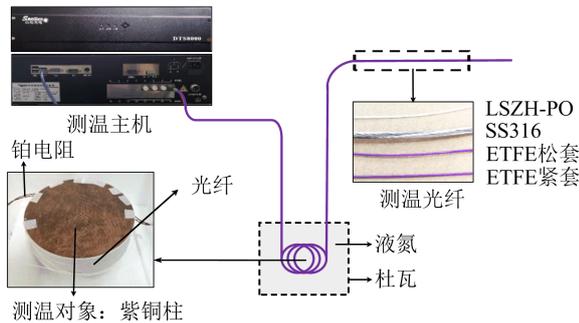
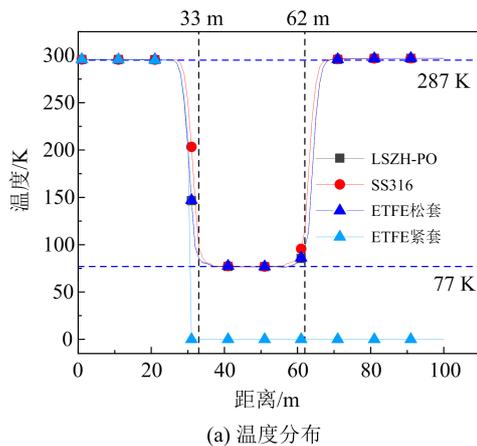


图 1 分布式光纤测温系统实验平台

对 4 种 100m 长的不同封装测温光纤分别进行稳态(287 K 和 77 K)测温实验和动态温升实验, 对



比分析不同封装材料、结构和厚度对光纤测温精度和温度灵敏度的影响, 确定耐低温性能和测温性能最好的测温光纤. 其中, 动态温升过程中, 液氮挥发后紫铜柱温度由 77 K 升至 287 K, 距离光纤接口 44~46 m 的光纤缠绕于紫铜柱上, 取 45 m 处测温结果同 PT100 铂电阻测温结果进行对比.

## 4 实验结果及讨论

### 4.1 稳态测温实验

#### 4.1.1 实验结果

为了验证 4 种不同封装光纤在低温下的测温性能, 将每根光纤取 28 m 静置于液氮中, 实验结果如图 2 所示. 由图 2(a)可知, 0~33 m、62~100 m 距离内的光纤处于室内 287 K 温度环境中, 33~62 m 距离内的光纤处于液氮 77 K 低温环境中. 使用 LSZH-PO 紧套、SS316 和 ETFE 松套封装的光纤耐低温性能好、可正常测温, 使用 ETFE 紧套封装的光纤温度值在 287 K 与 77 K 温度交界面附近(距离光纤接口 31 m 处)突变为 0 K, 严重偏离实际温度值. 图 2(b)为测量液氮温度时测温主机采集到的光纤沿线拉曼比值: ETFE 紧套光纤的拉曼比值在 31 m 位置后突变为 0, 说明在 31 m 位置后的拉曼散射光信号强度为 0, 即 ETFE 紧套光纤在 31 m 处断开, 其耐低温性能差, 导致 31 m 后解调得到的温度值为 0 K.

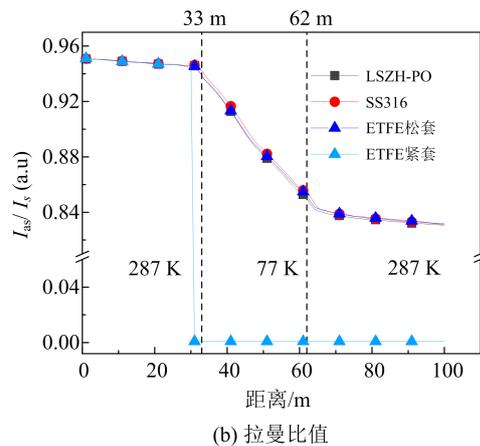


图 2 液氮温度测量时光纤沿线温度分布及其拉曼比值

#### 4.1.2 实验结果分析

测温光纤纤芯石英热膨胀系数约为  $8.7 \times 10^{-6} / \text{K}^{[14]}$ , 由表 1 可知, 三种封装材料的热膨胀系数远大于光纤纤芯, 在低温下封装的收缩变形也就

远大于光纤纤芯.

(1)在室温 287 K 与低温 77 K 过渡区域内 ETFE 收缩不均匀, 导致 ETFE 收缩变形对纤芯沿线的作用力不均匀, 使光纤纤芯弯曲产生裂纹甚至

断开。

(2)对于 ETFE 松套光纤和 SS316 光纤,由于封装和光纤纤芯之间存在气隙,可有效消减低温下封装材料的剧烈收缩对光纤纤芯产生的影响,光纤可耐低温并正常测温。

(3)LSZH-PO 属于热塑性弹性体,其性能类似低温硅胶,虽然会在低温下收缩变形,但能保持一定的弹性、较柔软,不会对光纤纤芯产生过大的作用力.因此,LSZH-PO 紧套光纤可在低温下正常测温。

稳态测温实验中,取上述 3 种耐低温光纤 37~54 m 范围内的温度测量结果,如图 3 所示.在恒温环境(287 K / 77 K)下,三种测温光纤的测温精度相差不大,都在 1 K 以内,验证了三种测温光纤在低温下测温的可行性。

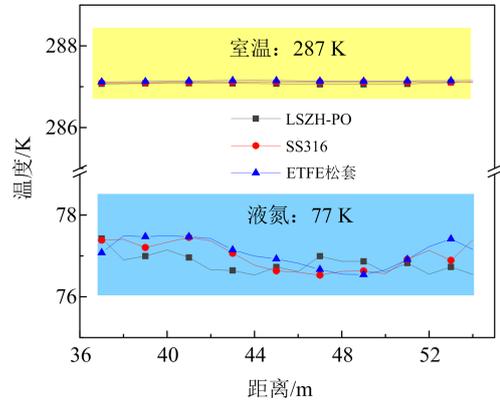


图 3 室温和液氮温度测量时光纤沿线温度分布

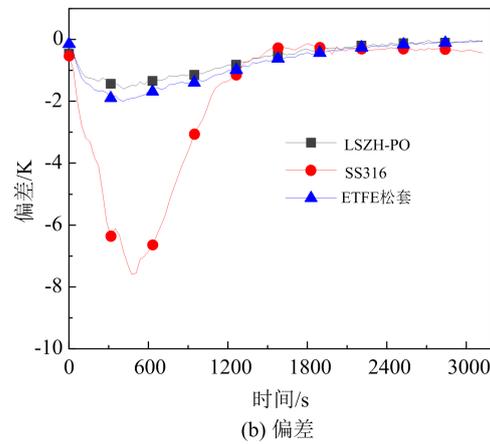
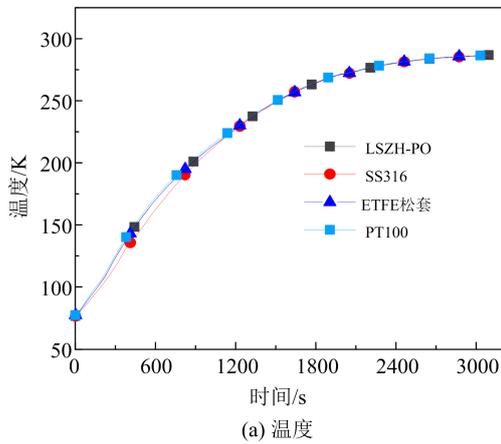


图 4 温升过程中温度测量值与偏差

#### 4.2.1 实验结果

##### (1)测温偏差和响应速度

以铂电阻温度值为参考温度,图 4 为 77~287 K 温升过程中光纤 45 m 处温度测量值及其与铂电阻测量值之间的偏差.除 SS316 以外,其余两种光纤与 PT100 铂电阻的温度曲线大体一致.光纤与铂电阻测量结果最大偏差绝对值分别为 1.51 K (LSZH-PO 紧套光纤)、1.98 K (ETFE 松套光纤)和 7.56 K (SS316 光纤).上述差异主要是由不同封装光纤拉曼比值在温度上升时的响应速度不同导致的.图 5 为温升过程中光纤拉曼比值随时间变化关系图.在 0~1200 s 时间段内温度快速上升,三种光纤的拉曼比值也随之快速上升,其中 LSZH-PO 紧套光纤响应速度最快、测温偏差最小,而 SS316 光

#### 4.2 动态温升实验

紫铜柱在 77~287 K 动态温升过程中,主要通过光纤动态测温偏差、响应速度和温度灵敏度三个指标来检验其测温性能.实验结果如图 4~6 所示。

纤响应速度最慢,其拉曼比值变化较其余两种光纤延迟了大约 18 s,导致 SS316 光纤测温偏差最大。

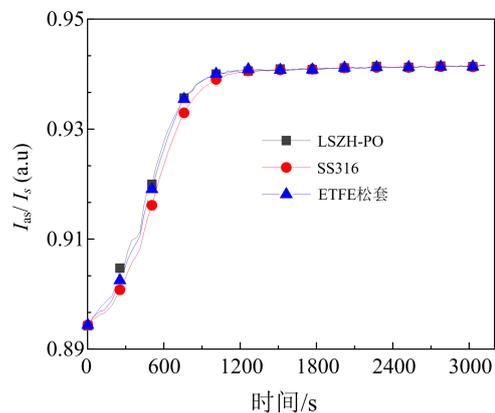


图 5 温升过程中光纤 45 m 处拉曼比值

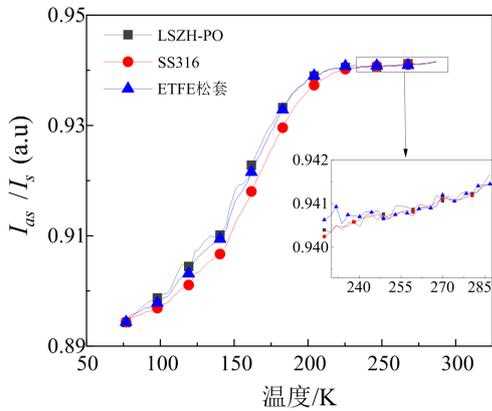


图6 光纤 45 m 处拉曼比值-温度变化关系

### (2) 温度灵敏度

温升过程中, 光纤 45 m 处拉曼比值-温度关系如图 6 所示. 三种耐低温测温光纤在低温 77~230 K 温区内的拉曼比值-温度变化关系曲线是非线性的, 230~287 K 内呈线性变化状态, 且低温下测温光纤的温度灵敏度更高. 经计算, 三种光纤在 77~287 K 温区内的平均温敏系数分别为 0.13% / K (LSZH-PO 紧套光纤)、0.094% / K (ETFE 松套光纤) 和 0.062% / K (SS316 光纤), LSZH-PO 紧套光纤温度灵敏度最高, ETFE 松套光纤次之, SS316 光纤最低.

#### 4.2.2 实验结果分析

温升过程中不同封装光纤测温偏差、响应速度和温度灵敏度不同的主要原因在于三种光纤封装结构和厚度不同. 由表 1 可知, SS316 导热系数要远高于 LSZH-PO 和 ETFE, 但其外径为 3.3 mm, 远大于外径为 0.9 mm 的 LSZH-PO 紧套光纤和 ETFE 松套光纤, 气隙和过厚的封装阻碍了 SS316 光纤纤芯和紫铜柱之间的热传导, 使得 SS316 光纤在 0~1200 s 快速温升时的拉曼比值对温度变化的响应速度慢于其他两种光纤, 继而导致其测温偏差最大、温度灵敏度最低; 而 ETFE 导热系数略低于 LSZH-PO, 且 ETFE 松套光纤封装和纤芯之间也存在气隙, 导致 ETFE 松套光纤响应速度和温度灵敏度也略低于 LSZH-PO 紧套光纤. 同时, 松套光纤存在气隙导致其防水性能较差, 光纤纤芯可能接触到水分发生水解反应、产生裂纹影响光信号的传输.

由稳态测温 and 动态温升实验可知, 四种光纤中温度灵敏度高、防水性能好的 LSZH-PO 紧套光纤

较其他三种光纤更适宜于超导电缆的温度测量. 为了验证温度变化时 LSZH-PO 紧套光纤长距离、连续测温的可行性, 记录其在 77~287 K 温升过程中的沿线温度分布结果如图 7 所示.

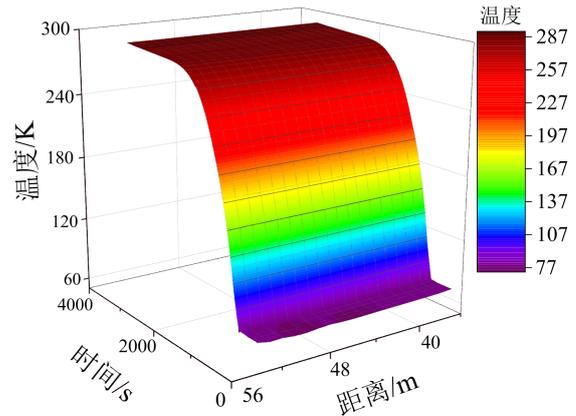


图7 LSZH-PO 紧套光纤沿线温度分布

由图 7 可知, 在 77~287 K 温升过程中, LSZH-PO 紧套光纤在同一时刻的沿线温度分布均匀、几乎无抖动, 说明其在时间(对应温度变化)和空间(对应 OTDR 技术定位、解调)上的测温性能稳定、可靠, 有望用于监测超导电缆低温冷却过程及其沿线温度分布.

## 5 结论

本文测试了 4 种不同封装光纤在 77 K~287 K 温区内的测温性能. 根据实验结果, 封装材料、结构和厚度对光纤的测温影响均有影响. 具体如下:

(1) 采用耐低温弹性材料封装的紧套光纤, 其弹性体封装材料在低温下仍具有弹性、较柔软, 低温环境下材料的剧烈收缩对光纤影响很小.

(2) 对防水性能要求不高的应用场合, 若封装材料为非弹性体, 可使用松套结构以消减低温下封装的收缩变形对光纤产生的影响.

(3) 封装材料过厚会降低光纤测温的响应速度和温度灵敏度, 实际应用时需合理考虑光纤机械强度、测温灵敏度和响应速度, 以达到综合性能最优.

(4) 在四种光纤中, 综合考虑光纤防水性和低温测温性能, LSZH-PO 紧套光纤较其他三种更适用于监测超导电缆低温冷却过程及其沿线温度分布.

参 考 文 献

- [1] L. Ren, Y. Tang, J. Shi, L. Li, J. Li, S. C. Cheng, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **19** (2009), 1774.
- [2] 应启良, 黄崇祺, 魏东. 电线电缆, **05** (2003) 3.
- [3] 喻小艳, 李敬东, 唐跃进. 中国工程科学, **05** (2003) 73.
- [4] J. Jiang, Y. Zhao, Z. Hong, J. Zhang, Z. Li, D. Hu, D. Qiu, A. Zhao, K. Ryu, Z. Jin, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **28** (2018), 1.
- [5] J. Jiang, L. Zhong, X. Duan, M. Song, L. Li, Z. Wu, Z. Li, Z. Huang, Z. Hong, Z. Jin, L. Yao, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **29** (2019), 1.
- [6] C. D. Boyd, E. E. Horrell, E. M. Lally, B. D. Dickerson, *2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings*, **8-9** Oct. 2012, 1.
- [7] T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek, A. J. Rogers, *Opt. Lett.*, **22** (1997), 787.
- [8] G. Yilmaz, S. E. Karlik, *Sensors and Actuators A: Physical*, **125** (2006), 148.
- [9] 孙安, 乔学光, 贾振安, 郭团, 陈长勇. 中国激光, **32** (2005) 224.
- [10] 周智, 赵雪峰, 武湛君, 万里冰, 欧进萍. 中国激光, **29** (2002) 1089.
- [11] C. C. Chan, C. Z. Shi, J. M. Gong, W. Jin, M. S. Demokan, *Opt. Commun.*, **215** (2003), 289.
- [12] D. Hwang, D.-J. Yoon, I.-B. Kwon, D.-C. Seo, Y. Chung, *Opt. Express*, **18** (2010), 9747.
- [13] H. Wu, H. Xu, C. Wang, D. Zhao, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Art. no. 80280L.
- [14] 张勇, 魏广庆, 施斌, 卢毅. 电子测量与仪器学报, **24** (2010) 929.