

基于 π 移相光纤布拉格光栅的高精度温度测量

于波 景明勇 胡建勇 张国峰 肖连团 贾锁堂

山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006

摘要 光热效应会引起 π 移相光纤布拉格光栅的频率起伏,故将入射激光衰减至单光子量级,以消除光热效应的影响。通过对入射单光子信号进行强度调制,使用锁相放大器直接解调光电转换的晶体管-晶体管逻辑电平(TTL)信号,利用 π 移相光纤布拉格光栅对环境温度进行测量,温度测量精度达到 0.14 °C。

关键词 光纤光学; π 移相光纤布拉格光栅; 温度测量; 单光子; 光热效应

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.080604

High Precision Temperature Measurement Based on π -Phase-Shifted Fiber Bragg Grating

Yu Bo Jing Mingyong Hu Jianyong Zhang Guofeng Xiao Liantuan Jia Suotang

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy,
Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract The photothermal effect can induce the frequency fluctuations of π -phase-shifted fiber Bragg grating (PSFBG), so the incident laser is attenuated to the single photon level in order to eliminate the photothermal effect. The intensity of the incident single photon is modulated, and then the transistor-transistor logics (TTL) signal pulses of photoelectric conversion are directly demodulated with the lock-in amplifier. Thereby the environmental temperature is measured by using the PSFBG. The precision for temperature measurement is up to 0.14 °C.

Key words fiber optics; π -phase-shifted fiber Bragg grating; temperature measurement; single photon; photothermal effect

OCIS codes 060.3735; 190.4870; 280.6780

1 引言

在 π 移相光纤布拉格光栅 (PSFBG) 中心引入 π 相位突变,可在阻带中形成窄带透射峰,这种窄线宽的 π 移相光纤光栅^[1-2]被广泛应用于传感检测和激光系统等。通过把待测物理量的变化转化为布拉格波长的移动, π 移相光纤光栅可用于测量超声波、压力和温度等参数^[3-5]。另外, π 移相光纤光栅可以用作光学波长滤波器,抑制腔内多纵模振荡实现单频激光输出^[6-7];也可滤除半导体激光器的白噪声,从而提升激光器性能^[8-9]。然而,入射激光在光栅内多次往返传输,光栅中心累积的激光能量比入射光的能量大三个数量级,由此产生的光热效应引起光栅频率移动(约为 1.2 pm/mW)^[10-12]。对于窄带 π 移相光纤光栅,由光热效应引起的频率移动可与透射带宽相比拟,因此温度测量精度通常在 1 °C 左右。

本文将入射激光强度衰减至单光子量级以有效地消除激光光热效应引起的光栅频率起伏。采用单光子调制技术^[13]测量光栅透射光谱,通过强度调制单光子信号,利用锁相放大器直接解调相应光电转换的晶体

收稿日期: 2016-04-12; **收到修改稿日期:** 2016-05-13; **网络出版日期:** 2016-07-21

基金项目: 国家 863 计划(2011AA010801)、国家自然科学基金(11374196, 61527824, 10934004, 11204166)、教育部创新团队发展计划(IRT13076)

作者简介: 于波(1987—),男,博士研究生,主要从事量子保密通信方面的研究。E-mail: yubo6688@126.com

导师简介: 肖连团(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事量子信息与激光光谱方面的研究。

E-mail: xlt@sxu.edu.cn(通信联系人)

管-晶体管逻辑电平(TTL)信号,并且获得对应于布拉格中心波长的色散信号,从而利用 π 移相光纤布拉格光栅测量了外部环境温度。

2 实验装置

实验装置如图1所示,单纵模线偏振光纤激光器(Orbits Lightwave Inc., ETH)输出1550 nm单频激光(线宽小于1 kHz),输出激光经过衰减器(ATT)衰减至单光子量级(平均光子数约为0.1),利用偏振控制器(PC)调节光偏振使其对准 π 移相光纤布拉格光栅(Teraxion, TFN)慢轴,光栅放置于温控箱(TEC)中以提高温度稳定性。函数发生器(FG)生成锯齿波扫频信号和锁相放大器(LIA, Stanford Research Systems, Inc., SR830)生成的正弦波调制信号,经过加法器和高压放大器(HVA)(Orbits Lightwave Inc., HVA-1)后加载到激光器压电陶瓷(PZT)端口。单光子探测器(SPD, Quantum, QCD-300)用于测量光栅的透射光信号,透射信号通过光电转换器转换为相应的TTL脉冲进入锁相放大器解调,同时利用示波器(OSC, LeCroy, WS44MXS-B)采集锁相放大器输出的色散信号。

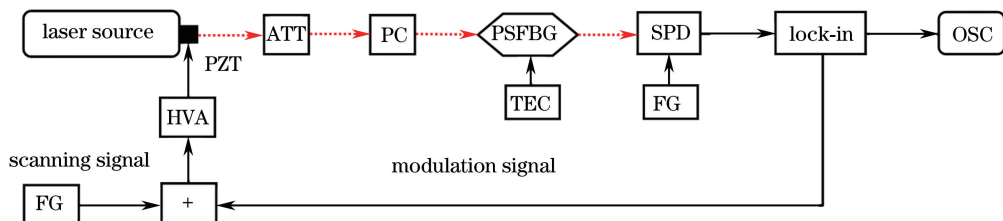


图1 π 移相光纤布拉格光栅温度测量的实验装置图(虚线是光信号,实线是电信号)

Fig. 1 Experimental setup of temperature measurement using PSFBG
(dashed lines for light signal, solid lines for electrical signal)

光栅布拉格波长移动与环境温度变化的对应关系为^[14] $\Delta\lambda = \lambda(\alpha + \zeta)\Delta T$, 式中 $\Delta\lambda$ 是布拉格波长移动量, λ 是布拉格波长, ΔT 是温度变化量, α 是光纤热膨胀系数, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$, Λ 是光栅间距, ζ 是光纤热光系数,

$\zeta = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T}$, n 为光纤有效折射率。光热效应会对光栅产生加热作用,导致光栅周期和光纤有效折射率发生变化,从而引起布拉格波长变化。将入射激光强度衰减至单光子量级,消除了光热效应引起的布拉格波长起伏。

实验中采用Teraxion公司生产的超窄带 π 移相光纤光栅,利用宽带光源测量得到的光栅透射光谱如图2所示。由于保偏光纤的快轴和慢轴折射率不同,在阻带中心存在两个窄带透射峰,慢轴布拉格波长较长,超窄线宽约为65 MHz(0.52 pm)。利用慢轴透射峰的布拉格波长移动来监测环境温度变化。

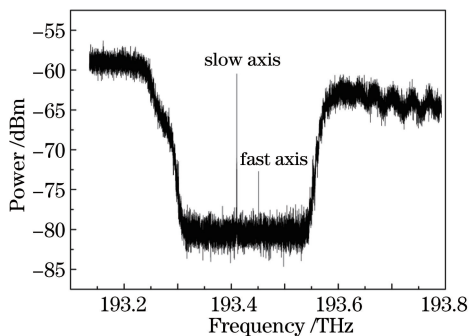


图2 π 移相光纤光栅透射光谱

Fig. 2 PSFBG transmission spectrum

3 实验结果

入射激光衰减到单光子量级(平均光子数0.1),透射光栅后的单光子信号被强制调制,即单光子的探测

概率被调制,图 3(a)为通过单光子探测器后输出的离散 TTL 信号分布。实验中,激光器 PZT 端锯齿波扫描频率为 10 Hz,正弦波强度调制频率为 1 kHz,这里采用单光子调制解调技术抑制光子计数量子涨落的干扰。利用锁相放大器解调调制频率处的信号,抑制其他频率噪声,提高测量的信噪比。这里锁相放大器的积分时间为 3 ms,经过锁相放大器同频解调后的光谱色散信号如图 3(b)所示,光栅慢轴透射峰中心对应于色散信号的中心零点位置。温度变化会引起慢轴布拉格波长改变,在时域上表现为色散信号的中心零点发生移动,据此可以利用色散信号的位置移动来监测环境温度变化。与通常光子计数方法相比,这里采用的单光子调制解调技术具有光谱采集速度快和信噪比高的优势,因而更适合对温度的快速测量。

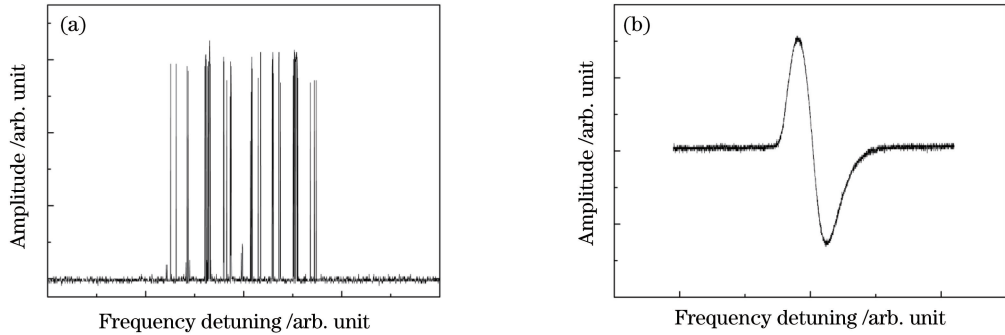


图 3 (a) 单光子探测器输出的 TTL 信号; (b) 锁相放大器输出的色散信号

Fig. 3 (a) Output TTL signal from SPD; (b) dispersive signal from LIA

利用计算机读取光栅的环境温度值,根据激光器 PZT 加载电压与扫描频率的对应关系标定布拉格波长,测量结果如图 4 所示。可以发现当温度在 55~62 °C 之间时,随着温度升高,布拉格波长发生线性红移,线性拟合的相关系数 $R^2=0.994$,布拉格波长随温度线性变化的灵敏度为 11.5 pm/°C,与已有的光纤光栅测量结果一致^[1,4]。这里布拉格光栅慢轴线宽为 0.52 pm,理论上光栅的温度测量精度为 0.05 °C,由于外部环境压力随机扰动引起激光和光栅之间的相对频率漂移^[15-16],实际温度测量不确定度为 1.6 pm,所对应的温度测量精度为 0.14 °C。

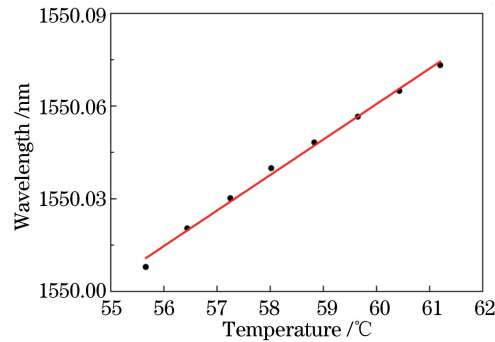


图 4 布拉格波长与温度的关系

Fig. 4 Relationship between Bragg wavelength and temperature

4 结 论

研究采用单光子量级入射激光消除光热效应对测量结果的影响,利用单光子强度调制与解调技术实现了 π 移相光纤布拉格光栅对环境温度的测量,温度测量灵敏度为 11.5 pm/°C。这种装置采用单光子量级的入射激光消除了光热效应的影响,有效改善了超窄线宽 π 移相光纤布拉格光栅测量的光谱分辨率与测量精度。由于这种 π 移相光纤布拉格光栅传感器同时对温度和压力敏感,因此在实际应用中温度测量时,需要对由于压力变化引起的波长移动进行修正。该传感器为全光纤结构,具有测量分辨率高、体积小和抗电磁干扰等优点,适合在需要精确控温的环境(如光学超稳腔、激光头等)中对温度进行高精度测量。

参 考 文 献

- 1 Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamental and overview[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1263-1276.
- 2 He J, Wang Y, Liao C, *et al.* Highly birefringent phase-shifted fiber Bragg gratings inscribed with femtosecond laser[J]. Opt Lett, 2015, 40(9): 2008-2011.
- 3 Liu T, Han M. Analysis of π -phase-shifted fiber Bragg gratings for ultrasonic detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(7): 2368-2373.
- 4 Zhang Q, Liu N, Fink T, *et al.* Fiber-optic pressure sensor based on π -phase-shifted fiber Bragg grating on side-hole fiber [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(17): 1519-1522.
- 5 Chehura E, James S W, Lawson N, *et al.* Pressure measurements on aircraft wing using phase-shifted fibre Bragg grating sensors[C]. SPIE, 2009, 7503: 750334.
- 6 Zhao Y, Chang J, Wang Q, *et al.* Research on a novel composite structure Er^{3+} -doped DBR fiber laser with a π -phase shifted FBG[J]. Opt Express, 2013, 21(19): 22515-22522.
- 7 Li Q, Yan F P, Peng W J, *et al.* A single frequency, linear cavity Tm-doped fiber laser based on phase-shifted FBG filter [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56: 304-306.
- 8 Ayotte S, Costin F, Aubé M, *et al.* Semiconductor laser white noise suppression by optical filtering with ultra-narrowband FBG[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011: OThP5.
- 9 Ayotte S, Costin F, Brochu G, *et al.* White noise filtered C-band tunable laser for coherent transmission systems[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012: OTu1G.5.
- 10 Chow J H, Sheard B S, Mc Clelland D E, *et al.* Photothermal effects in passive fiber Bragg grating resonators[J]. Opt Lett, 2005, 30(7): 708-710.
- 11 Littler I C M, Grujic T, Eggleton B J. Photothermal effects in fiber Bragg gratings[J]. Appl Opt, 2006, 45(19): 4679-4685.
- 12 Painchaud Y, Aubé M, Broch G, *et al.* Ultra-narrowband notch filtering with highly resonant fiber Bragg gratings[C]. Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, 2010: BTuC3.
- 13 Wang X, Zhang G, Chen R, *et al.* Detection efficiency enhancement of single-photon detector at 1.55- μm by using of single photons lock-in and optimal threshold[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(6): 1773-1775.
- 14 Shivananju B N, Asokan S, Misra A. Study on effect of optical wavelength on photo induced strain sensitivity in carbon nanotubes using fiber Bragg grating[J]. J Phys D: Appl Phys, 2015, 48(27): 275502.
- 15 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun, *et al.* A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 89-91.
张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 89-91.
- 16 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei, *et al.* High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605003.
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605003.