

文章编号: 1001-3806(2005)02-0150-03

基于光纤光栅级联调谐技术的波长检测系统

陈长勇, 乔学光*, 贾振安, 郭 团, 孙 安
(西安石油大学 光纤传感实验室, 西安 710065)

摘要: 报道了一种检测光纤光栅传感器波长的新方案。实验系统采用新型的级联结构对电热调谐的光纤光栅滤波器进行复用, 扫描分析传感信号光的峰值波长, 同时用参考波长校准方法消除了电热调谐中的蠕动误差。结果表明, 系统的检测范围可达 23nm, 波长分辨率为 3.1μm, 应变测量分辨率为 2.56με。

关键词: 光纤光栅; 传感器; 波分复用; 波长检测

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Study on wavelength detection system based on tunable filters with a novel multiplexing structure

CHEN Chang-yong, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, GUO Tuan, SUN An
(Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China)

Abstract A novel wavelength detection scheme is demonstrated for measuring the wavelength of fiber grating sensors. A new cascaded structure is used in the experimental system multiplex fiber grating tunable filters. The peak wavelength of sensing signal in scanning mode is analyzed. The calibration technique is adopted by the reference wavelength which eliminates the error induced by wavelength creepage when the filters are tuned. The results show that the detection range reaches 23nm, the wavelength resolution is 3.1μm, and the strain resolution is 2.56με.

Key words fiber Bragg grating (FBG); sensor; wavelength division multiplexing; wavelength detection

引 言

光纤光栅传感器对被测信息采用绝对波长量编码, 免受电磁干扰和光强波动的影响, 并且容易在单根光纤上实现准分布式测量, 因而倍受关注^[1-2]。该类传感器实用化的关键是波长量的检测, 已报道的解决方案有可调谐 F-P 滤波器法^[3]、可调谐激光器扫描法^[4]、CCD 成像光谱技术^[5]、非平衡马赫-曾德尔干涉仪法^[6]、压电陶瓷驱动的匹配光纤光栅滤波法^[7], 各具优缺点。

本文中基于调谐滤波分析原理, 提出采用由大线膨胀系数材料粘贴于半导体制冷片上的光纤光栅作为调谐滤波元件, 并运用新型的级联结构进行复用, 从而实现传感信号光的光谱分区滤波处理。这种复用调谐方案共用同一个调谐机构和波长读取机构, 同时又

保持了高的光能利用率和反射式滤波中信噪比高的优点。此外, 实验采用参考波长对调谐波长的读取进行实时校准, 消除了电热调谐过程中的蠕动误差, 提高了检测的准确性。

1 实验系统

系统原理如图 1 所示, 宽带光源 (BBS) 进入传感器阵列 (FBG_{s1}, FBG_{s2}, ..., FBG_{sn}) 后, 各传感光栅分别反射窄带信号光, 并经过耦合器 (coupler) 返回进入波长检测单元 (detection unit)。

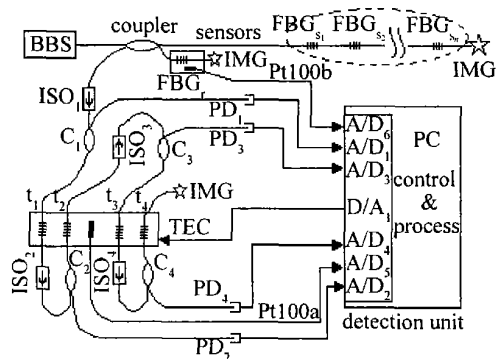


Fig 1 Schematic diagram of the experimental system

信号光中每个峰值波长 λ_s 的变化量正比于传感器 FBG_{s_i} 所在被测点处的应变 $\Delta \epsilon_i$ 和温度 ΔT_i 变化量:

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (2002AA313150); 国家自然科学基金资助项目 (69877025); 国家教育部科学技术重点资助项目 (02190)

作者简介: 陈长勇 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感技术及光纤通信方面的研究工作。

* 通讯联系人。Email: xgqiao@xysu.edu.cn

收稿日期: 2004-02-23 收到修改稿日期: 2004-04-26

$$\lambda_{s_i} = \lambda_{s_i 0} + K_{\varepsilon_i} \times \Delta\varepsilon_i + K_{T_i} \times \Delta T_i \quad (1)$$

式中, $\lambda_{s_i 0}$, K_{ε_i} , K_{T_i} 分别为第 i 个传感器的初始波长、应变和温度响应系数。分析出 λ_{s_i} 即可推算出待测的应变或温度信息。

波长检测单元中选用的 4 个光纤光栅滤波器 (FBG_i用 t_i 表示) 由相位掩模板干涉法写入, 带宽均约为 0.19nm, 自由状态下 (20℃) 中心波长分别为 1541.6nm, 1547.3nm, 1553.5nm, 1559.2nm, 总的调谐区间可覆盖常用的传感器波长范围。采用耐高温环氧类聚合物将 FBG_i 并行粘贴于半导体制冷片 (TEC) 的同一表面上, 由光纤隔离器 (ISO_i) 和耦合器 (C_i) 进行级联。通过对 TEC 施加正向/反向电压来对 FBG_i 加热/制冷, 从而实现滤波器波长的调谐, 并利用高精度传感器 Pt100a 实时监测其上的温度 $T(t)$, 作为波长读取信号。温度-波长调谐系数:

$$d\lambda/dT = [(\alpha + \zeta) + (1 - P_e) \times (\alpha_y - \alpha)] \times \lambda_0 \quad (2)$$

式中, α , ζ 为光纤的热膨胀系数和热光系数, P_e 为有效弹光系数, α_y 为聚合物的线膨胀系数。FBG_i 由掺锗石英光纤制成, 故代入 $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\zeta = 6.7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $P_e = 0.22$, $\alpha_y = 47 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\lambda_0 = 1550 \text{nm}$, 由此可得 $d\lambda/dT \approx 0.067 \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。实验测得的系数均为 0.061nm/°C。

系统通过数/模转化端口 (D/A₁) 来控制 TEC 的电压, 可使 FBG_i 处的温度从 -10℃ 升至 85℃, 图 2 为 FBG₃ 波长调谐过程中的反射光谱图。

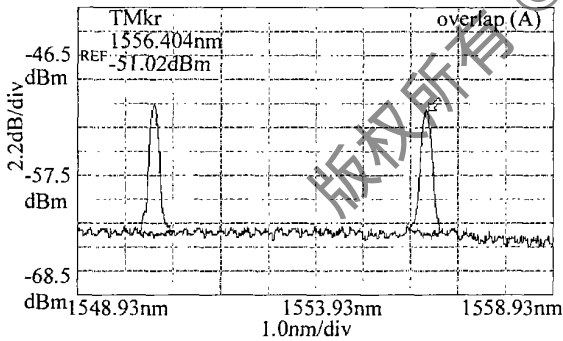


Fig 2 The reflectance spectrum of the tuned FBG₃

根据光谱仪 (Anritsu MS9710C) 测得的实验数据进行温度-波长调谐曲线拟合, 线性度可达 0.9952。4 个滤波器的总调谐区间约为 23nm, 未发现明显啁啾, 在此不再赘述。

传感信号光传输经过 4 个光栅滤波器 FBG_i 时, 波长与 FBG_i 反射波长相同的光将被反射, 反射光强 $P_i(t)$ 被光探测器 (PD_i) 接收放大, 并进入计算机多通道同步采集通道 (A/D_i), 剩余的光被折射率匹配液 (MG) 吸收。波长读取信号 $T(t)$ 由通道 A/D₅ 同步采集。因此, 在 $T(t)$ 从 -10℃ 升至 85℃ 的过程中, $P_i(t)$ 是在 FBG_i 调谐区间上对信号光的滤波反射光强, 通过

程序搜索到 $P_i(t)$ 的峰值时刻 t_c , 则 $T(t_c)$ 对应的 FBG_i 波长即为传感信号光的峰值波长。温度 T 与 FBG_i 波长 λ_i 的标定公式为:

$$\lambda_i = \lambda_{i 0} + 0.061 \times [T(t) - 20] \quad (3)$$

式中, $\lambda_{i 0}$ 是温度为 20℃ 时 FBG_i 的波长。

在实验中发现, 虽然光纤光栅的电热调谐线性度很高, 但其调谐波长会随时间变化而整体漂移, 即 $\lambda_{i 0}$ 不恒定。笔者认为这主要是由于材料自身的蠕变造成的, 具有随机性和不可预测, 造成波长绝对量的测试误差。为了消除该误差, 系统采用一根自由放置的光纤光栅 FBG_r 提供参考波长 λ_r (20℃ 时为 1541.4nm), 其精确值根据同一点处的温度推算出, 该温度则由传感器 Pt100b 监测和通道 A/D₆ 采集获得。于是, 利用 (3) 式由 FBG_i 检测到 FBG_r 的波长值为 λ_{r_i} , 然后用 λ_{r_i} 与 λ_r 的偏差值对 FBG_i 波长 λ_i 的标定公式进行实时校准:

$$\lambda_i(t) = \lambda_{i 0} + (\lambda_{r_i} - \lambda_r) + 0.061 \times [T(t) - 20] \quad (4)$$

选用的聚合物材料均匀, 在 -10℃ 至 85℃ 区间热胀冷缩性能稳定, 而且各光纤光栅热敏感特性一致, 实验显示, 该补偿校准方法有效地提高了测试准确性。

2 结果与分析

实验采用的宽带光源 (Lightcomm C+LASE) 总功率高达 12dBm, 3dB 带宽约 85nm, 4 个光探测器均为单管型 PN 光电二极管 (PD GT322D), 接入放大电路后的最小可探测光功率为 0.2nW。选用双级型偏振无关的光隔离器, 插入损耗仅为 0.3dB, 隔离度高达 58dB, 保证了各滤波通道间互不干扰, 传感信号到达各滤波器的光能均高于 76%。

系统的控制处理由多通道高速数据采集卡 (Adlink PCI9112) 和 VC++ 语言编写的软件完成。图 3 所示为系统执行单次测量时采集到的各通道信号,

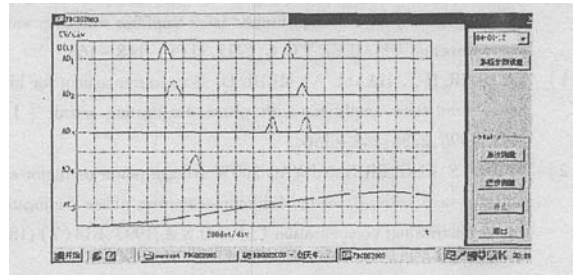


Fig 3 Signal output of each channel in scanning process

传感器阵列由波长为 1543.5nm, 1547.1nm, 1549.5nm, 1554.6nm, 1555.4nm, 1558.9nm 的 6 个自由光纤光栅串接而成。可以看出, 光探测通道共出现 7 个峰值区, 第 1 个对应参考光栅, 其余的对应传感光栅。滤波光强的峰区出现在预计的位置中, 表明系统工作正常, 可以

按上节原理搜索峰值波长了。

为测试系统性能,选用光纤光栅(1552.3nm)粘贴于由复合材料制成的等强度梁上,靠微位移器对其施加拉应变,应变由自制应变仪读取。图4是测量数据与系统读出所作的对比图,经过最小二乘直线拟合,得到系统测量灵敏度为 $0.02^{\circ}\text{C}/\mu\epsilon$,线性度为 0.9921 。

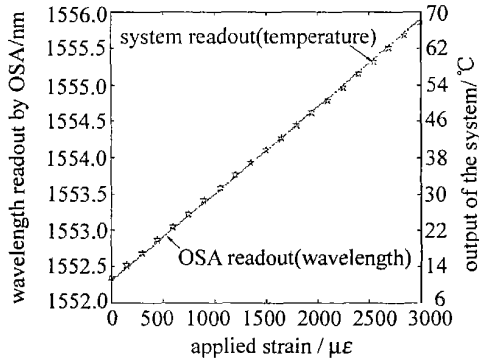


Fig 4 Readout contrast between OSA and the system

分别按照(3)式和波长校准(4)式,利用程序推算出传感光栅的波长,作为系统的测量值,通过光谱仪测得传感光栅的波长作为实验真值。在测量数据多于20点的情况下,结果显示,未采用校准时系统读出值的误差均在 0.04nm 以内,实时校准后波长测试的误差均在 0.017nm 以内。认为采用多个离散的参考波长可进一步减小误差。

实验中采用高精度变送器电路使Pt100a的温度读取分辨率达到 0.05°C ,于是系统可读取的最小波长

变化量由(3)式可得: $\delta\lambda_{\text{min}} \approx 0.061 \times \delta T \approx 0.061 \times 0.05 \approx 0.0031\text{nm}$ 。根据传感光栅的应变响应关系式 $\delta\lambda/\lambda_0 = 0.78\delta\epsilon$ 可知,应变测量分辨率约为 $2.56\mu\epsilon$ 。

3 结 论

报道了一种采用新型复用调谐结构的光纤光栅传感器波长检测方案。实验系统对电热调谐的光纤光栅滤波器进行复用,同时采用参考技术对波长读取进行实时校准,消除了电热调谐过程中的蠕变误差,提高了检测的准确性。该系统结构简单、成本低,有望应用于油气井下或输油管线上压强、温度的在线监测。

参 考 文 献

- [1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J *et al*. Fiber grating sensors [J]. *J Lightwave Technol* 1997, 15(8): 1442~1463.
- [2] 鲍吉龙,章献民,陈抗生 *et al*. 光纤光栅传感器及其应用 [J]. *激光技术*, 2000, 24(3): 174~179.
- [3] KERSEY A D, BERKOFF T A, MORF E W W. Multiplexed Bragg grating fiber laser strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wave length filter [J]. *Opt Lett* 1993, 18(16): 1370~1372.
- [4] LISSAK B, ARIE A. Highly sensitive strain measurements by locking lasers to fiber Bragg gratings [J]. *Opt Lett* 1998, 23(24): 1930~1932.
- [5] HU Y, CHEN S, ZHANG L *et al*. Multiplexing Bragg grating using combined wavelength and spatial division technique with digital resolution enhancement [J]. *Electron Lett* 1997, 33(23): 1973~1975.
- [6] KERSEY A D, BERKOFF T A, MORF E W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron Lett* 1992, 28(3): 236~238.
- [7] 谢芳,张书练,李岩 *et al*. 光纤光栅反射波长移动研究 [J]. *激光技术*, 2002, 26(2): 84~85.
- [8] ALEKSEEV V N, GOLUBEV V V, DIMITRIYEV D *et al*. Investigation of wavefront reversal in a phosphate glass laser with a 12cm output aperture [J]. *Soviet JQ E* 1987, 17(4): 455~458.
- [9] VESHEV D, VELCHEV I M A, JEW SKI W A *et al*. SBS pulse compression to 200ps in a compact single cell setup [J]. *Appl Phys* 1999, B68: 671~675.
- [10] DANE C B, ZAPATA L E, NEUMAN W A *et al*. Design and operation of a 150W near diffraction limited laser amplifier with SBS wave front correction [J]. *IEEE JQ E*, 1995, 31(1): 148~163.
- [11] EICHLER H J, HAASE A, MEHL O. Serial arrangement for high power solid-state amplifiers with phase conjugating mirror [J]. *SPIE*, 1996, 2788: 148~156.
- [12] SEIDEL S, KUGLER N. Nd:YAG 200W average power oscillator-amplifier system with stimulated Brillouin scattering phase conjugation and depolarization compensation [J]. *JO S A*, 1997, B14(7): 1885~1888.
- [13] 刘朗,秘国江,黄茂全 *et al*. 高重复频率大能量单纵模激光器 [J]. *中国激光*, 2003, 30(10): 886~889.
- [14] 丁磊,隋展,张小民 *et al*. 高光束质量Nd:YAG激光系统的研制 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(s1): 197~200.
- [15] ANDREEV N F, KHAZANOV E A, KUZNETSOV S V *et al*. Locked-phase conjugation of two beams of pulse-repetition rate solid-state laser [J]. *IEEE JQ E*, 1991, 27(1): 135~142.
- [16] ANDREEV N F, KHAZANOV E A, PASMANK G A. Applications of Brillouin cells to high repetition rate solid-state lasers [J]. *IEEE JQ E*, 1992, 28(1): 330~341.
- [17] SUMIDA D S, JONES D C, ROCKWELL D A. An 8.2J phase conjugate solid-state laser coherently combining eight parallel amplifiers [J]. *IEEE JQ E* 1994, 30: 2617~2627.
- [18] RIDLEY K. Phase locked phase conjugation by Brillouin-induced four wave mixing [J]. *JO S A*, 1995, B12: 1924~1932.
- [19] ANDREEV N F, KHAZANOV E A, KULAGIN O V *et al*. A four-channel repetitively pulsed Nd:YAG laser operating at 25Hz with diffraction limited beam quality [J]. *IEEE JQ E*, 1999, 35(1): 110~114.
- [20] RISSE E, MEHL O, RIESBECK T *et al*. Continuously pumped all-solid-state laser systems with fiber phase conjugate mirror [J]. *SPIE*, 2001, 4184: 179~182.
- [21] RIESBECK T, RISSE E, EICHLER H J *et al*. Pulsed solid-state laser system with fiber phase conjugation and 315W average output power [J]. *Appl Phys* 2001, B73(8): 847~849.
- [22] EICHLER H J, MEHL O, RIESBECK T *et al*. High-brightness laser systems with fiber phase conjugation [J]. *CLEO*, 2000, B7: 177.
- [23] RIESBECK T, RISSE E, EICHLER H J *et al*. Pulsed solid-state laser systems with high brightness by fiber phase conjugation [J]. *SPIE*, 2002, 5131: 59~64.

(上接第122页)