

基于激光器激射特性的新型应变传感系统

罗绍均^{1,2,3)} 郭文刚^{1,2,3)} 杨秀峰¹⁾ 吕福云^{2,3)} 吕 超¹⁾

1) Lightwave Department, Institute for Infocomm Research, Singapore 637723)

2) 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

3) 南开大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2005 年 8 月 24 日收到, 2005 年 11 月 30 日收到修改稿)

报道了一种基于掺铒光纤激光器瞬态特性的新型应变传感系统. 用光纤环反射镜和光纤 Bragg 光栅 (FBG) 构成 Fabry-Perot 线型腔. 腔内插入一个长周期光纤光栅 (LPG), 其透射谱的中心波长为 1574.4 nm. FBG 的带宽为 0.23 nm, 不受力时其反射波长为 1557.98 nm, 位于 LPG 的透射谱左沿; 当 FBG 受力时激射波长向长波方向移动, 激光通过 LPG 时透射损耗增大, 腔损耗的增加将使激光激射延迟时间增加. 因此, 应变的大小可以通过激光产生的延迟时间来测量. 这种新型应变传感器的分辨率和灵敏度由抽运光脉冲的高、低功率电平决定, 传感器的动态测量范围由抽运光脉冲高功率电平决定. 当高、低功率电平分别为 32 和 6 mW 时, 该应变传感器的灵敏度和分辨率分别可达 $7 \times 10^{-6} \text{ } \epsilon/\mu\text{s}$ 和 $7 \times 10^{-7} \text{ } \epsilon$.

关键词: 应变传感, 光纤激光器, 时域测量, 光纤 Bragg 光栅

PACC: 4281P

1. 引言

光纤传感器具有体积小、重量轻、可抗电磁干扰等优点, 受到了广大用户及科学工作者的青睐. 近年来已广泛应用于工业生产及环境监测等领域^[1-3]. 光纤光栅的反射波长对应变和温度都非常敏感, 当光纤光栅受力或者环境温度发生变化时, 其反射波长将发生漂移^[4]. 实用的光纤光栅传感系统除了设计优良的传感头外, 还需要精度高、结构简单、价格低廉的解调技术. 国内外已报道了很多解调方法^[5-12], 一般而言, 大都是将光纤光栅反射波长的变化转换为输出功率或者相位等物理量的变化. 为了消除光源不稳定性影响, 通常将光束分为参考光和信号光进行相关探测, 这使检测系统和光路都相应变得复杂, 不利于降低系统成本. 据我们所知, 将光纤光栅反射波长的改变转化到时域进行解调的方法还很少报道.

本文报道了一种基于掺铒光纤激光器瞬态特性的应变传感解调新方法. 将光纤光栅受力时引起的波长变化量, 通过在谐振腔内引入长周期光纤光栅 (LPG) 转换为激光激射时间延迟量. 时域测量使得信号检测更为简单和精确, 而且传感器输出信号为激光, 具有很高的信噪比. 这种新型应变传感器的灵

敏度和分辨率由抽运光脉冲的高、低功率电平决定, 传感器的动态测量范围由抽运光脉冲高功率电平决定. 当高、低功率电平分别为 32 和 6 mW 时, 该应变传感器灵敏度和分辨率分别可达 $7 \times 10^{-6} \text{ } \epsilon/\mu\text{s}$ 和 $7 \times 10^{-7} \text{ } \epsilon$.

2. 实验装置和测量原理

应变传感器的实验装置如图 1 所示. 由光纤环反射镜和光纤 Bragg 光栅 (FBG) 组成 Fabry-Perot (F-P) 激光谐振腔. 不受应变时 FBG 的反射波长为 1557.98 nm, 反射率为 72%, FBG 既是激光输出端镜又作为应变传感头. 增益介质为 3 m 长的掺铒光纤, 掺杂浓度为 3×10^{-4} , 数值孔径为 0.23. 在腔中加入了一个 LPG, 其透射谱如图 2 所示, 其中心波长为 1574.4 nm. 采用频率 10 Hz 的方波调制 980 nm 激光二极管 (LD) 的驱动电流. 抽运光脉冲通过波分复用

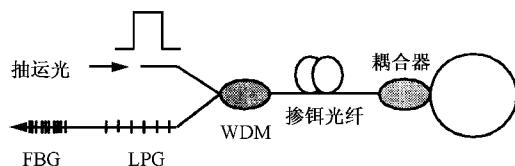


图 1 实验装置示意图

器(WDM)抽运掺铒光纤.

掺铒光纤激光器的瞬态特性已有大量研究^[13-15],当抽运光功率大于阈值时,在输出稳定的激光之前会出现弛豫振荡,从抽运光注入到产生第一个振荡脉冲有一定的延迟时间 T_b ,其原因是产生

激光的反转粒子数的建立需要一定的时间. T_b 定义为抽运光起始至观察到第一个激光弛豫振荡脉冲之间的时间间隔. Sola 等^[15]从速率方程出发,利用小信号微扰的近似方法来处理该非稳态问题,推导出 T_b 的表达式

$$T_b = \frac{\ln \left(1 + \frac{(\ln T - \gamma_a(\nu_l)L) \left\{ P_p(\gamma_a(\nu_p) + \gamma_c(\nu_p)) + \frac{h\nu_p N_T}{\tau} \right\}}{P_p \gamma_a(\nu_p) (\gamma_a(\nu_l) + \gamma_c(\nu_l))L} \right)}{P_p \frac{\gamma_a(\nu_p) + \gamma_c(\nu_p)}{h\nu_p N_T} + \frac{1}{\tau}}, \tag{1}$$

式中, T 为谐振腔损耗, P_p 为抽运功率, h 为普朗克常数, L 为腔长, N_T 为增益介质的总掺杂浓度, τ 为粒子在激光上能级的寿命, $\gamma_a(\nu)$ 和 $\gamma_c(\nu)$ 分别表示激活介质的吸收和发射系数,与抽运光的频率 ν_p 和激光的频率 ν_l 有关. 不难看出,延迟时间 T_b 与激活介质增益特性、抽运功率和腔损耗相关. 我们知道,在 1550 nm 附近掺铒光纤的增益比较平坦,当抽运功率一定时,从(1)式可以看出, T_b 将随腔损耗的增加而增大.

长也将随之向长波方向移动. 从图 2 可以看出,随着波长的增加激光在腔内每次通过 LPG 时引起的腔损耗将增加,进而影响掺铒光纤激光器的瞬态特性.

综上所述,当应变作用于 FBG 时,输出的激光波长将随 FBG 的 Bragg 反射波长的变化而往长波方向移动. 由于腔中加入了 LPG,激光波长往长波方向移动将引起腔损耗增大,进而影响激光器的瞬态特性,使其产生激光的延迟时间变长,而且这个变化是单调的. 因此,我们可以通过测量激光产生的延迟时间,得出加在 FBG 上应变的大小.

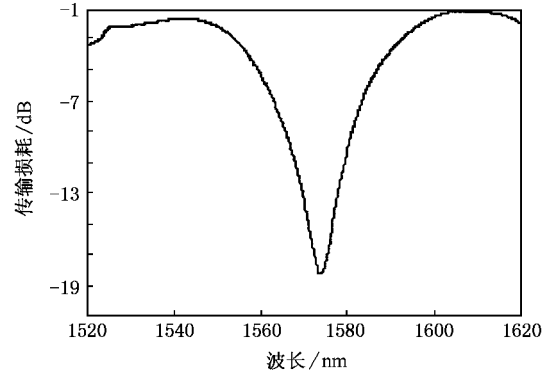


图 2 长周期光栅透射光谱

FBG 不受力时,其 Bragg 反射波长为 1557.98 nm,位于 LPG 透射谱的左沿,该波长的激光通过 LPG 时将引起 4.25 dB 的腔损耗. 当应变传感头 FBG 受力时,其 Bragg 反射波长可表示为^[16]

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha \lambda_0 \epsilon, \tag{2}$$

式中, λ 为 FBG 加上应变 ϵ 时的 Bragg 反射波长, λ_0 为 FBG 不受力时的 Bragg 反射波长, α 为 FBG 应变-波长响应系数. 从(2)式可知,随着应变的增加,FBG 的 Bragg 反射波长将往长波方向移动,从而激光激射波

3. 实验结果和讨论

实验中,抽运光以方波脉冲方式注入腔内,频率为 10 Hz. 如此低的频率是为了使产生激光时,跃迁到高能态的铒离子有足够的时间在下一个抽运脉冲来临之前能完全回到低能态,以更好地获得掺铒光纤激光器的瞬态特性. 实验中抽运脉冲的高、低功率电平均可调,让低功率电平始终低于激光器的抽运阈值功率(6 mW),高功率电平始终高于激光器的阈值. 图 3 是实验观察到的一个典型实例,处于上方的曲线代表抽运光信号,下方的曲线是输出的激光信号. 从图 3 可以看出,抽运脉冲高功率电平为 19 mW,低功率电平为 4 mW,产生激光的延迟时间为 374 μ s. 当 FBG 不受力时,我们研究了 T_b 与抽运脉冲高功率电平的关系,如图 4 所示. 从图 4 可以看出,随着抽运功率的增加,产生激光的延迟时间呈指数下降,其物理机制是:抽运功率的增加使得铒离子形成粒子数反转速度越来越快,从而使达到激射激光的延迟时间 T_b 变短. 实验结果与文献^[13-15]的结果一致.

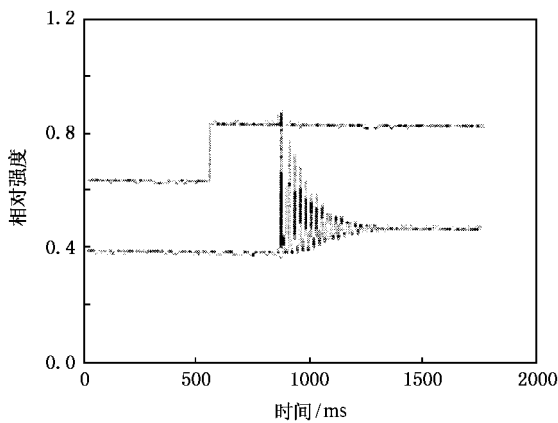


图 3 实验观察到激光器的瞬态特性 上方曲线代表抽运光信号,下方曲线代表激光输出信号

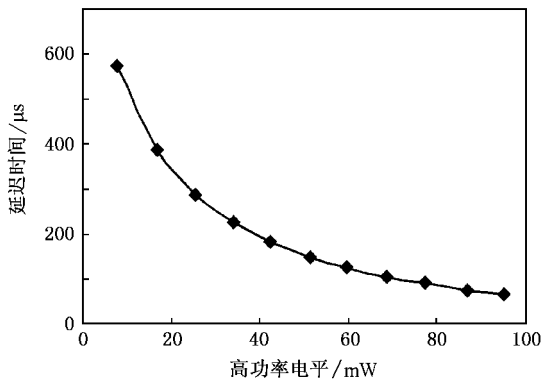


图 4 激光器的延迟时间与抽运脉冲高功率电平的关系 抽运脉冲低功率电平为 4 mW

我们研究了影响该传感器灵敏度和分辨率的因素.实验发现,抽运脉冲高、低功率电平设置对传感器的分辨率和灵敏度有较大影响.图 5 表示高功率电平固定为 90 mW 时,激光延迟时间变化量 ΔT_b 随应变的变化情况.同时给出了低功率电平对应变传感器灵敏度的影响,抽运低功率电平越接近阈值,传感器的灵敏度越高.我们可以这样解释:如果固有腔损耗较大,施加在 FBG 上的应变引起的腔损耗变化相对就较小,因此激光激励延迟时间对应变的敏感程度就较低.通过升高抽运脉冲低功率电平,可以使固有腔损耗得到补偿,激光激励延迟时间对应变引起腔损耗的变化就较敏感,也就是提高了应变传感器的灵敏度.抽运脉冲低功率电平固定为 5 mW 时,抽运脉冲高功率电平对激光延迟时间变化量 ΔT_b 随应变变化的影响如图 6 表示.从图 6 可以看出,抽运高功率电平越小,传感器的灵敏度越高.这一点很容易理解,因为在同样的腔损耗条件下,抽运功率越

小产生激光的延迟时间就越长,所以抽运脉冲高功率电平越小,传感器的灵敏度越高.值得注意的是,抽运高功率电平的大小同时影响传感器的测量范围.当加到 FBG 的应变增加时,腔损耗将增大,使激光器的阈值增加,抽运高功率电平必须保证在激光器的阈值之上.

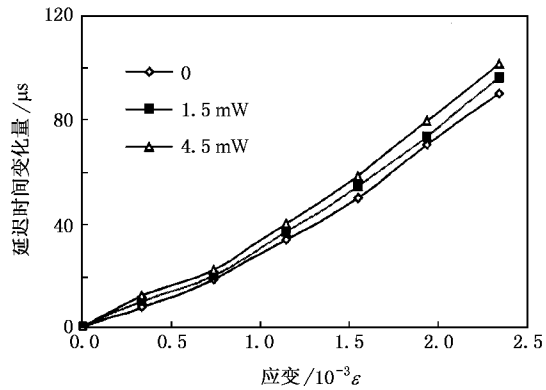


图 5 激光延迟时间的变化量与应变的关系 抽运脉冲高功率电平固定为 90 mW

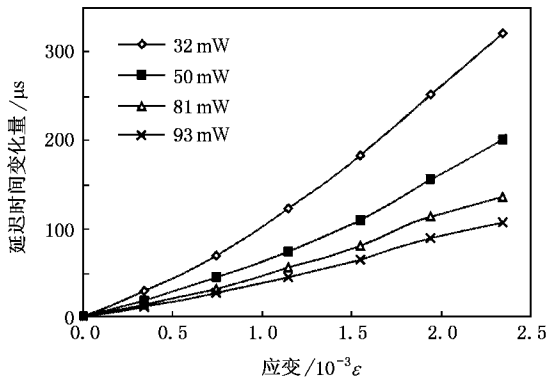


图 6 激光延迟时间的变化量与应变的关系 抽运脉冲低功率电平固定为 5 mW

值得指出的是,为了使 FBG 应变传感器获得较好的灵敏度和分辨率,需要非常仔细地调节抽运脉冲的高、低功率电平.抽运低功率电平越接近阈值,在保证传感器的测量范围条件下,高功率电平越小传感器的灵敏度和分辨率也就越高.为了提高系统的灵敏度,在实验中我们应该尽量降低激光腔的固有损耗.当 FBG 受到同样的应变时,激光器具有较低的阈值,从而提高了系统的灵敏度.当 FBG 不受力时,激光器的阈值约为 6 mW. FBG 受力时(保证不受损坏的前提下)其反射峰可向长波方向移动 6 nm,激光在腔内往返一次损耗将增加 15.8 dB,实验得出此时激光器阈值达到 27 mW.为了保证测量

范围,抽运脉冲高功率电平应高于该值.实验中,抽运脉冲的高、低功率电平分别为 32 和 6 mW,当应变从零变到 $2 \times 10^{-3} \epsilon$ 时 ΔT_b 变化了 $285 \mu\text{s}$,该传感器的平均灵敏度可达 $7 \times 10^{-6} \epsilon/\mu\text{s}$.传感系统可以测量的时间误差为 $0.1 \mu\text{s}$,传感器的分辨率为 $7 \times 10^{-7} \epsilon$.

4. 结 论

基于掺铒光纤激光器的瞬态特性,本文设计了

一种 FBG 应变传感器,把应变的变化转换到时域测量.通过调节抽运脉冲的高、低功率电平,可以获得较高的分辨率和灵敏度.时域测量使得信号检测相对容易,能使用价格较为低廉的检测设备,很有实用价值.该实验是在室温下进行的,环境温度的影响并未考虑.LPG 对应变和温度也很敏感,因此有必要进行绝热和防震封装.若要将该传感器实用化,设计相应的数据采集系统及人机交互界面也是今后值得研究的课题.

[1] Giallorenzi T G , Bucaro J A , Dandridge A J *et al* 1982 *IEEE Trans . Microw . Theory Tech .* **32** 472

[2] MacDonald R I , Nychka R 1991 *Electron . Lett .* **27** 2194

[3] Culshaw B 2004 *J . Lightwave Technol .* **22** 39

[4] Kersey A D , Davis M A , Patrick H J *et al* 1997 *J . Lightwave Technol .* **15** 1442

[5] Melle S M , Liu K , Measures R M 1992 *IEEE Photon . Technol . Lett .* **4** 516

[6] Davis M A , Kersey A D 1994 *Electron . Lett .* **30** 75

[7] Araujo F M , Ferreria L A , Santos J L *et al* 1998 *Opt . Lett .* **37** 7940

[8] Kersey A D , Berkoff T A , Morey W W 1993 *Opt . Lett .* **18** 1370

[9] Lobo A B , Ferreira L A , Santos J L *et al* 1997 *Appl . Opt .* **36** 934

[10] Xu M G , Geiger H , Archambault J L *et al* 1993 *Electron . Lett .* **29** 1510

[11] Kersey A D , Berkoff T A , Cheo P K 1994 *J . Lightwave Technol .* **12** 700

[12] Qiao X G , Jia Z A , Fu H W *et al* 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 494 (in Chinese)[乔学光、贾振安、傅海威等 2004 物理学报 **53** 494]

[13] Rebolledo M A , Jarabo S 1994 *Appl . Opt .* **33** 5585

[14] Luo L , Chu P L 1998 *Opt . Commun .* **149** 307

[15] Sola I J , Martin J C , Alvarez J M *et al* 2001 *Opt . Commun .* **193** 133

[16] Magne S , Rougeault S , Vilela M *et al* 1997 *Appl . Opt .* **36** 9437

A novel fiber strain sensor based on laser 's transient regime

Luo Shao-Jun^{1 2 3)} Guo Wen-Gang^{1 2 3)} Yang Xiu-Feng¹⁾ Lü Fu-Yun^{2 3)} Lü Chao¹⁾

1 ǻ Lightwave Department , Institute for Infocomm Research , Singapore 637723 , Singapore)

2 ǻ Institute of Physics , Nankai University , Tianjin 300071 , China)

3 ǻ Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education , Nakai University , Tianjin 300071 ,China)

(Received 24 August 2005 ; revised manuscript received 30 November 2005)

Abstract

A novel fiber strain sensor based on the fiber laser 's transient regime is reported. A Sagnac fiber loop and a fiber Bragg grating(FBG) that also acts as the sensing element form the linear Fabry-Perot cavity , in which a long-period grating(LPG) is inserted. The original peak wavelength of the FBG , whose bandwidth is 0.23 nm , is 1557.98 nm and located on the left side of the LPG dip(1557.4 nm). The light reflected from the Sagnac loop and the FBG is transmitted through the LPG twice in each round trip , and the transmission loss increases with the strain-induced wavelength shift of the FBG , which in turn modifies the laser build-up time. The strain value can be obtained by measuring the build-up time of the laser. In the present experiment , the sensor 's sensitivity and resolution can be adjusted by simply controlling the pumping level. When the pump pulse 's high level and low level are 32 and 6 mW , respectively , a sensitivity of $7 \times 10^{-6} \epsilon / \mu s$ and resolution of $7 \times 10^{-7} \epsilon$ are achieved.

Keywords : strain sensor , fiber laser , time domain , fiber Bragg grating

PACC : 4281P