

文章编号: 0258-7025(2003)06-0501-04

全光型激光微片高灵敏度压强传感器

黄春宁, 李 岩, 张书练

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 提出并实现了一种新型全光型压强传感器。用 LD 输出光经光纤抽运圆片状 Nd:YAG 微片, 被测压强通过传递膜片加到晶体径向上。由于应力双折射效应, 此微片激光器输出光的频率发生分裂。输出的频率分裂激光经光纤传输至光电接收器, 其拍频经光电转化成正弦频率电信号, 探测该频差即可得到被测压强。对此激光器的出光模式对测量的影响进行了研究。实验获得了 1.31 MHz/kPa 的测量灵敏度。证明此压强传感器适于高灵敏度测量, 有广泛的应用前景。

关键词 传感器技术; 全光型压强传感器; 频差; LD 抽运 Nd:YAG 激光器; 双频

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

All-optical High Sensitivity Pressure Sensor with Microchip Laser

HUANG Chun-ning, LI Yan, ZHANG Shu-lian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract This paper proposed and realized a novel all-optical pressure sensor. It is achieved by using fiber-coupling laser diode (LD) to pump the Nd:YAG microchip. The pressure was imposed indirectly on the radial direction of the crystal by a pressure-transferring device. As a result of the stress birefringence the microchip laser's longitudinal mode was split into two with different frequency. The frequency splitting signal is coupled into fiber, detected by a photodiode and then changed as a detectable beat frequency signal. There is a direct proportional relation between the frequency difference and the pressure imposed on the microchip, so pressure can be obtained. Moreover, the effect of the modes on the measurement error was finished. A result of 1.31 MHz/kPa was achieved in the experiment, so it can be used in the high sensitivity measurement and has a broad application future.

Key words sensor technique; all-optical pressure sensor; frequency difference; Nd:YAG laser pumped by LD; dual frequency

1 引 言

在一些特殊环境(如油井压力测量)中,对压强传感器提出了许多特殊的要求,如防爆、防电火花以及长期测量无需更换的电池等。目前可用的传感器并不能满足这些要求。比如晶体石英谐振压力传感器,灵敏度为 0.1 kPa,精度为万分之几。但是温度变化会对预紧力和敏感元件刚性产生影响,从而影响石英晶体压强传感器的零点和灵敏度。如果将其

用于油井压力测量,由于从地表到井内温度的剧烈变化势必会给测量结果带来影响。而且石英谐振式力传感器输出的频率信号一般相对较高,现在使用的主要在 3.58 MHz,而其灵敏度远小于传感器基本频率,频率变化很容易被其基频信号淹没。而光纤压强传感器在用光纤本身做传感元件时,受环境温度、拉伸等多种参数影响,稳定性存在问题。其他如膜盒式、应变片式压强传感器对于易燃、易爆、高温等危险场所的压强测量很不适宜。还有油井中传

收稿日期:2002-03-18; 收到修改稿日期:2002-04-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:59775088)资助项目。

作者简介:黄春宁(1977—),女,辽宁省鞍山市人,清华大学精密仪器系光学工程专业硕士研究生。现从事 LD 抽运微片 Nd:YAG 激光传感原理及应用技术的研究。E-mail:huangcn@post.pim.tsinghua.edu.cn

统的压力传感器使用电池作为供电电源,测量时间有限,需要经常更换电池,并且必须设计特殊的电路,以便将传感器输出的弱电信号进行远距离传输。

本文提出并实现了一种新型的全光型压强传感器。用波长为 808 nm 的激光二极管(LD)输出光经光纤耦合至圆片状 Nd:YAG 微片,被测压强通过压强传递膜片加到该晶体微片径向上。由于应力双折射效应,此薄片激光器频率发生分裂,频率分裂的输出激光经光纤传导至光电接收器,理论及实验表明频率分裂形成的拍频与加在晶体微片上的压强呈正比关系,因此可用于压强传感。由于对 Nd:YAG 微片的抽运光和 Nd:YAG 激光器的输出光均通过光纤传输,在被传感点完全没有电信号存在,因而实现了全光测量。

2 原 理

在激光器光学谐振腔内放入双折射元件(如天然双折射石英晶体、电光效应双折射元件,或光学材料受到外来压力产生应力双折射),激光器的振荡光束将分为寻常光(*o*光)和非常光(*e*光),且两种光有不同的频率,频率差 $\Delta\nu$ 可表示为^[1~3]

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{L}\delta \quad (1)$$

其中 ν 为激光中心频率, L 为激光谐振的光学腔长(即光程, $L = nl$, n 为光学谐振腔的折射率, l 为谐振腔几何长度), δ 为放入的双折射元件对 *o* 光和 *e* 光产生的光程差。将激光频率间隔(差)随 *o*,*e* 光程差改变而改变的现象称为激光纵模分裂。

用 LD 输出的波长为 808 nm 的激光抽运片状 YAG 激光器。当外部施加的压力通过硅油和膜片沿径向加在 YAG 薄片激光器上时,由于应力双折射效应,激光频率发生分裂,随压力改变,造成连续可改变的频差。有如下公式^[2]

$$\Delta\nu = \left(8 \frac{\nu}{L} \frac{\lambda}{\pi D f_0}\right) F \quad (2)$$

式中 ν , L 意义同前, λ 为激光波长, D 为片状 YAG 直径, f_0 为 YAG 应力双折射条纹系数^[4], F 为外部沿径向施加在 YAG 薄片上的压力。 $F = PS$, S 为受压面积, P 为压强。

$$\begin{aligned} \text{令 } E_0 &= \left(8 \frac{\nu}{L} \frac{\lambda}{\pi D f_0}\right) S, \text{ 则} \\ \Delta\nu &= E_0 P \end{aligned} \quad (3)$$

从(3)式可以看出,激光器频率分裂 $\Delta\nu$ (也即两频率之差)与压强之间呈线性关系。如果我们将被探

测压强通过传递膜片径向加到 Nd:YAG 晶体微片上,用光电探测器测出 Nd:YAG 激光器输出光的拍频,即可实现压强传感测量。

3 实 验 装 置

实验装置如图 1 所示。LD 发出的波长 808 nm 的激光经传光光纤 F_1 和透镜 L_1 (焦距 $f_1' = 50$ mm), L_2 (焦距 $f_2' = 55$ mm) 耦合到 Nd:YAG 晶体微片上,同时被测压强 P 通过传递膜片径向加到该微片上。Nd:YAG 晶体输出的波长 1064 nm 的激光经透镜 L_3 , 偏振片 PL 耦合进入输出光纤 F_2 。经 F_2 的输出光分成两路,一路光经透镜 L_4 聚焦到雪崩光电管 APD 的光敏面上,转换成电信号由频率计 FC 计数测出频差,另一路由扫描干涉仪 F-P 接收观察波形。

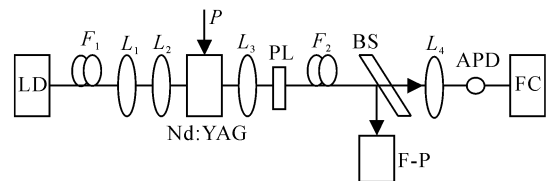


图 1 全光型激光微片压强传感实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for all-optical pressure sensor with microchip laser

我们在实验中选用的是光纤耦合端面抽运,抽运源是带尾纤输出的 QW-1000 型半导体激光器。Nd:YAG 晶体微片两端面镀膜,本身就构成激光器谐振腔。其中入射面为平面,镀膜对 1064 nm 波长高反而对 808 nm 波长增透;出射面为半径 100 mm 的球面,镀膜对 808 nm 波长高反并保证对 1064 nm 波长的光有足够的输出功率。晶体微片直径 5 mm,厚度实测 2.6 mm,掺钕浓度 0.9%~1.1%。

实验中的压力源为螺旋压力计(最大压力为 6 MPa),利用螺杆将液压油打入封闭压力腔中,并利用金属膜片及导力柱将压力最后导引到放置于压力腔底盖内的 Nd:YAG 晶体的直径方向上。在此系统中 Nd:YAG 晶体作为压强传感器直接感受压强,通过测量在不同压强下的频差值来测量压强值。

实验中加在压力计上的压强用量程为 6 MPa,最小刻度为 50 kPa 的 1 号压力计和量程为 0.1 MPa,最小刻度为 0.5 kPa 的 2 号压力计测量读数,输出频差转换成电信号后用频率计读出。

4 实验现象及结果

在光路的调节过程中发现,为保证激光输出,对抽运光垂直入射 YAG 晶体这一条件要求很高,而抽运光聚焦后焦点在 YAG 晶体中相对位置则相对要求不严格。在得到 1064 nm 激光后,沿光路调节 Nd:YAG 激光器,移动在 10 mm 以上都始终有激光输出(但要配合俯仰的调整)。同时,Nd:YAG 晶体的俯仰调整对激光输出的影响非常明显,其光强和模式均有非常明显的变化。

分析上述现象,主要是由于采用的透镜 L_2 的焦距比较长($f_2' = 55$ mm),汇聚角小,有较长的焦深,因此在 Nd:YAG 微片沿轴向移动的较大范围内(约

10 mm),仍可保证抽运光的能量汇聚强度。而抽运光不垂直入射 YAG 晶体时,虽然仍能出光,但出光横、纵模式都发生很大改变,影响拍频探测。

4.1 LD 抽运电流对 Nd:YAG 激光输出光模式的影响

QW-1000 型 LD 可连续大范围调节抽运电流(0.21~1.2 A),通过调节抽运电流并结合谐振腔的位置,可较容易地得到单纵模输出。图 2(a)为单纵模输出时通过 F-P 扫描干涉仪在示波器上观测到的波形,图 2(b)则是加大 LD 抽运电流得到的多模输出,可见图 2(a)信号峰值约 14 mV,远远弱于图 2(b)中的峰值(约 170 mV)。可见,单纵模的输出是以牺牲输出光强为代价的。

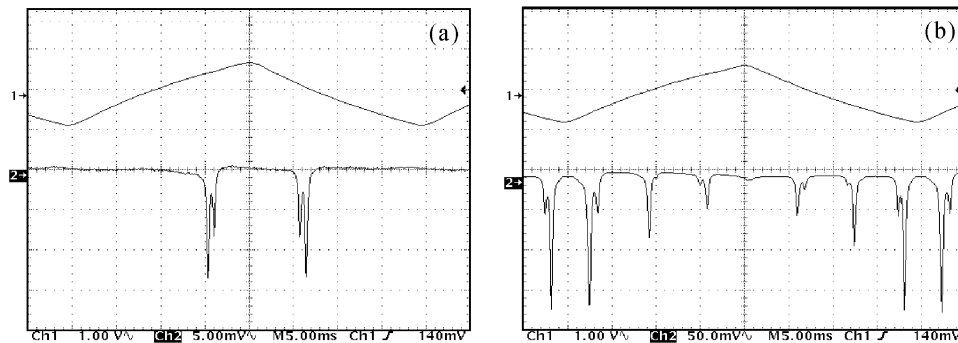


图 2 通过 F-P 扫描干涉仪在示波器上观测到的出光模式

(a) 单纵模输出;(b) 多模输出

Fig. 2 Observation of output modes by F-P in the oscilloscope

(a) single mode output; (b) complex mode output

实验中 Nd:YAG 激光器纵模间隔通过估算约为 32 GHz(腔长 2.6 mm,折射率 1.823),但同一纵模的分裂量拍频信号不超过 10 GHz,且光电接收器的截止频率为 700 MHz。这样不同级次纵模之间的拍频信号远远大于同一纵模的分裂拍频,更远远大于接收器的截止频率,光电接收器是无法接收到如此高频的信号的。所以,不同纵模之间的拍频信号并不会影响实验测量。不同纵模分裂量的频差大小差别仅几十赫兹,也不会影响测量。故测量用的 Nd:YAG 激光器既可工作在单纵模状态,也可工作在多纵模状态。所以对压力传感器的调节要求不苛刻,有利于实际应用。

4.2 实验结果及数据分析

实验中获得良好频差-压力的线性关系。但由于预紧力的偏差和晶体内部的残存应力均对零点处的频差有影响,所以直线拟合后的频差关系式为

$$f = f_0 + EP \quad (4)$$

式中, f 为测得频差(MHz), f_0 为零压力下初始频差(MHz), E 为直线斜率(MHz/kPa),即压强-频差灵敏度, P 为压力计示值(kPa)。图 3 为用 2 号压力计读数端面抽运所得的全光频率压力曲线。

线性拟合结果如下:

升压行程: $f_0 = 236.48771$, $E = 1.30895$,相关系数 $R = 0.9976$;降压行程: $f_0 = 236.74843$, $E = 1.31212$,相关系数 $R = 0.9981$ 。

由图 3 的(a),(b)曲线和拟合结果可以看出,在全光测量的升压和降压的过程中,实验数据的两条拟合曲线非常吻合,验证了理论的正确性和该种方案的实用性。但是由于实验条件所限,拍频信号耦合到光纤以及光纤耦合到光电探测器的效率比较低,因此在个别点的测量值与理想值有一定程度的波动。

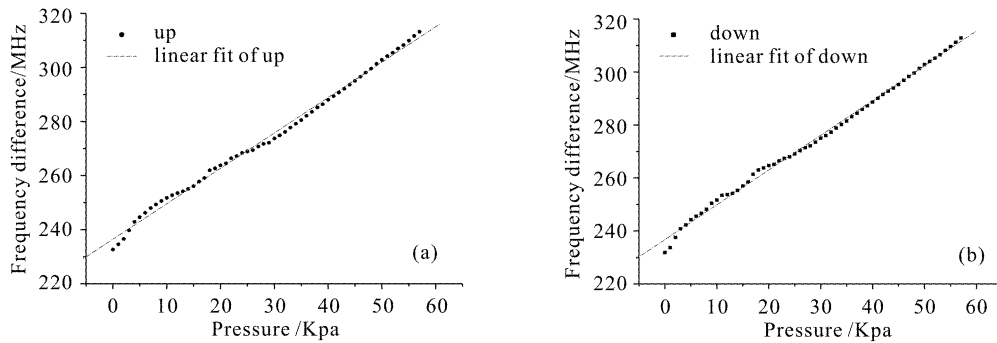


图3 全光测量所得的频差-压强曲线

(a) 升压过程; (b) 降压过程

Fig. 3 Relationship between frequency difference and pressure

(a) process of pressure-increasing; (b) process of pressure-decreasing

4.3 输出频率稳定度

上述测量过程中影响输出频率稳定度的主要因素并非是温度对 Nd:YAG 晶体造成的,而是由于传导压力的整个机构的稳定度不足以及光耦合的效率较低造成的。对机械机构的优化设计可提高稳定度。这是我们今后的工作。按文献[5]中 20 kHz/24 h 的稳定度计算,该实验系统具有的潜在的稳定度约为 15.3 Pa。

5 结 论

这种新型压力传感器采用光纤将抽运光导入 Nd:YAG 微片激光器,又用光纤把 Nd:YAG 微片激光器输出光导出,传感元件仅是 YAG 微片,输入输出引线都是传光光纤,不存在任何电信号的传播转换,既抗电磁干扰,又安全可靠。抽运源及传感信号的处理均在远离传感点的位置,使传感探头体积减小。输入输出光纤仅用于传光,不起传感作用,不像光纤压强计对环境那么大的敏感。代表压强的信号为频率信号,其本身就是脉冲式的,读出、

处理都很方便。而且 Nd:YAG 作为传感元件对温度并不敏感。因此本传感器用全光的方法,将适于很多特殊危险场合,可进行高精度的压强测量。

参 考 文 献

- 1 Yang Sen, Zhang Shulian. The frequency split phenomenon in a HeNe laser with a rotational quartz plate in its cavity [J]. *Opt. Comm.*, 1988, **68**(1):55~57
- 2 Zhang Shulian, Guo Hui, Li Kelian *et al.*. Laser longitudinal mode splitting phenomenon and its application in laser physics and active metrology sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1995, **23**(1):1~28
- 3 Li Yan, Zhang Shulian, Han Yanmei. Novel photoelastic birefringent dual-frequency lasers [J]. *Journal of Optoelectronics Laser* (光电子·激光), 2001, **12**(3):275~277 (in Chinese)
- 4 Zhao Qingcheng. Photoelasticity [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982. 9~11 (in Chinese)
- 5 W. Holzapfel, M. Finemann. High-resolution force sensing by a diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(23):2062~2064