

基于 F-P 腔干涉的两段式光纤传感器

徐正天, 杨树

(北京邮电大学 理学院, 北京 100876)

摘要:一般的传感器灵敏度高,但体积大,不便于封装。法布里-珀罗(F-P)腔型传感器结构简单、体积小和封装容易等优点获得了广泛关注。通过熔接2段不同折射率光纤,并将传感光纤包层去掉,浸泡在待测液体中,构成了F-P腔折射率传感器。传感器的最小分辨率为 3.0135×10^{-4} ,传感光纤长度仅为15 μm ,尺寸远小于其它F-P腔干涉仪,并且对传感光纤长度精度要求很低,便于制造。

关键词:法布里-珀罗腔干涉仪;折射率传感器;光纤

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)10-0009-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Two section optical fiber sensor based on F-P cavity interference

XU Zhengtian, YANG Shu

(School of Sciences, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: General sensors have high sensitivity, but they are bulky and not easy to package. Fabry-Perot(F-P) cavity type sensor has been widely concerned for its simple structure, small size and easy packaging. An F-P cavity refractive index sensor is formed by fusing two different refractive index optical fibers and immersing the sensing fiber cladding in the liquid to be measured. The minimum resolution of the sensor is 3.0135×10^{-4} , the length of sensing optical fiber is only 15 μm , the size is far smaller than other F-P cavity interferometers, and the accuracy of the length of sensing optical fiber is very low, so it is easy to manufacture.

Key words: Fabry-Perot cavity interferometer; refractive index sensor; optical fiber

0 引言

相位调制型光纤传感器利用待测参量对敏感单元的影响导致的信号相位微小变化,从而得到对应待测参量的数据。一般相位的微小变化可以通过干涉来进行测量,根据不同的干涉形式,可以将光纤干涉型传感器分为马赫-曾德尔型、Michelson型、Sagnac型和法布里-珀罗(F-P)腔型光纤传感器等。与其它干涉型传感器相比,F-P腔型传感器由于结构简单、无需耦合器、体积小和封装容易等优点获得了广泛关注。因此,本文提出一种基于F-P腔结构的两段式光纤传感器。

1 F-P腔干涉仪

干涉仪可以检测光纤中光波的相位变化量^[1]。光纤干涉仪有很多优点:容易准直、光路封闭和动态范围较大^[2]。假设2束相干光的光强分别为 I_1 和 I_2 ,当其中一束光的相位由于某种外界参量的变化受到影响时,在干涉仪中就会发生干涉。2束光干涉的光强可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (1)$$

其中, φ 为2束光产生的相位差。当信号射入有2个相对的反射面时,信号会在2个面间进行多次反射,这种多次反射效应产生了多光束干涉。F-P腔干涉仪是多光束干涉的一个重要应用实例,常被用作传感器。当反射率不高时,多光束干涉可以被简化为双光束干涉。经过多次反射的光较前只反射一次光存在数量级上的差异,小到可以被忽略。本文中2处光强反射率均在0.1%左右,除了直接反射光强度相近之外,其它经过多次反射的相干光束至少要比前者小6个数量级,使得计算可以简化为双光束干涉。

收稿日期:2020-02-11。

作者简介:徐正天(1995—),男,天津武清人,硕士生,主要研究方向是石墨烯器件与光纤传感。研究了石墨烯光纤构成的超小光电调制器,包括相位调制器与光开关等器件;研究了基于F-P腔的光纤传感技术,通过不同解调方式计算折射率。



2 F-P 腔实验原理

对于双光束干涉,可以通过测量干涉光的光强来确定相位差的变化,从而得到待测液体的折射率。在 F-P 腔中 2 束光产生的相位差 φ 为^[3]:

$$\varphi = \frac{4\pi L n_{\text{eff}}}{\lambda} \quad (2)$$

其中, L 为 F-P 腔长度, n_{eff} 为光纤内模式折射率, λ 为波长。本文中 F-P 腔光纤折射率传感器最小分辨率计算可以简化为:

$$\Delta n_a = \frac{\left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda} \frac{n_{\text{eff}}}{\lambda} \right)}{\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_a}} \Delta \lambda \quad (3)$$

其中, n_a 是环境折射率, $\Delta \lambda$ 是测量仪器的最小波长分辨率。从上述公式可以看出最小分辨率与传感光纤长度无关,即改变传感光纤长度并不会影响传感器的最小分辨率。因此,传感器的长度可以做得非常小(相对其它干涉型传感器)。虽然传感光纤的长度不会影响最小分辨率,但是会影响同一频段内波峰的数量。这就要求传感光纤的长度不能太短,能够保证干涉谱上任意情况下至少存在一个波峰或波谷。除了上述要求外,当波峰太密集时,可能使得不同波峰出现混淆,为测量波峰位置带来困难。为了容易辨别峰值移动距离,频率谱内峰值一般不会太多。

3 基于 F-P 腔干涉的两段式光纤传感器

3.1 传感器结构

基于 F-P 腔干涉的两段式光纤传感器结构如图 1(a) 所示,光纤由两部分组成:输入光纤和传感光纤,传感光纤没有包层,纤芯直接浸泡在待测液体中。图 1(b) 中红色箭头为光信号,在输入光纤与传感光纤界面处以及传感光纤与待测液体界面处信号发生反射。当被测液体折射率改变时,传感光纤内光纤信号的模式折射率 n_{eff} 随之改变,导致反射信号相位发生变化。相对于常见的 F-P 腔构需要镀反射膜或者

需要在光纤中加入空腔的结构,本文中的实验结构更加简单,而且对于传感光纤的长度精度要求很低,便于制造。

F-P 腔干涉仪由于使用 2 根反射的光束构成干涉,2 束光是由光纤参数决定的。本文使用的光纤参数为:输入光纤的纤芯折射率为 1.59,纤芯半径为 1 μm ,包层折射率为 1.4;传感光纤纤芯折射率为 1.48,长度为 15 μm ,没有包层,纤芯直接浸泡在待测液体中。本文中 2 段光纤模式均为单一模式,这需要计算光纤的 V 值,确保光纤是单模光纤。由于光纤 V 值由光纤半径与纤芯包层的折射率共同决定,所以这几个参数需要均衡地调整来保证光纤 V 值在光纤单模的阈值内。因为需要测量光束干涉的强度信息,所以需要在单模光纤的前提下使得 2 束光的强度尽可能大且一致,这样干涉图案能够比较清晰和准确。

3.2 传感器原理

基于 F-P 腔干涉的两段式光纤传感器的第一次反射为输入光纤到传感光纤发生的反射,第二次反射为传感光纤到待测液体的反射。输入光纤折射率与传感光纤折射率需要有一定的差距才能使得第一次反射率比较大。调整第一次反射的反射率有 2 种方法:改变输入光纤与传感光纤折射率差或者改变两光纤的半径。增大光纤纤芯折射率差或者增大两端光纤包层(传感光纤包层为待测液体)折射率差都能增大光强的反射率,而减少光纤半径也可以使得光纤反射率增大。对于第二次反射,由于包层是由待测液体构成的,这使得传感光纤无法改变包层折射率,只能依靠纤芯折射率与待测液体的折射率区别来控制光纤反射率。在调整反射率的同时还应保证光纤的 V 值在一定范围内。本文中的待测液体折射率范围为 1.31~1.36,传感光纤反射率变化规律与第一次反射类似。待测液体的折射率变化会同时导致第一次反射和第二次反射的反射率变化。由于纤芯与包层材料折射率变化是有限的,所以需要根据选取的材料及制作工艺来权衡具体的参数。如果光纤反射率过小,可能会影响探测器的精度,进而影响传感器的最小分辨率。

反射谱随待测液体折射率变化如图 2 所示。随着待测液体折射率增大,反射谱峰值所在波长随之增大。理论上选取反射谱上任意一点作为参考点都可以计算相位差,但是为了方便计算,一般选取相位差为 π 的倍数(即波峰或者波谷)作为计算点。在仿真中计算发现选取波峰或者波谷所计算出的相位差相同,考虑

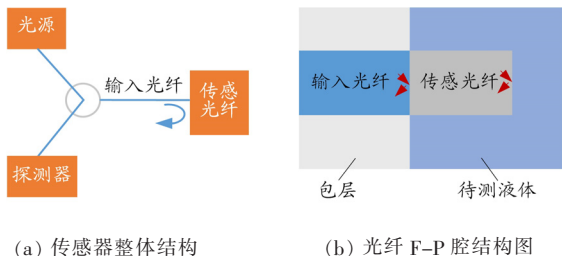
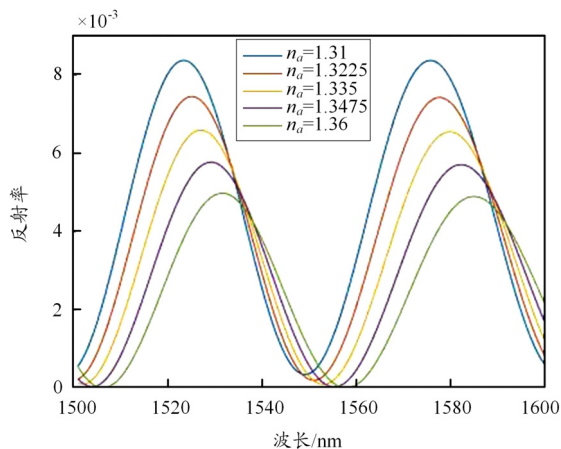
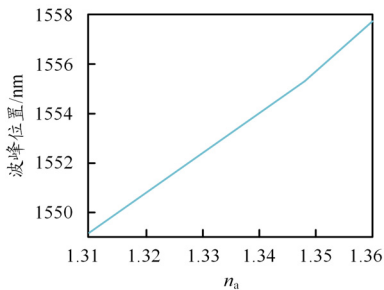


图 1 基于 F-P 腔干涉的两段式光纤传感器

图2 反射谱随待测液体折射率 n_a 变化

到光强比较强时探测器精度比较高,本文选取左边的波峰作为参考点来计算相位变化。通过仿真,计算得到当液体折射率从 1.31 转变为 1.36 时,波峰漂移了 8.296 nm;当探测器的波长最小分辨率为 0.05 nm 时,传感器的折射率最小分辨率为 3.0135×10^{-4} 。与其它 F-P 腔传感器相比^[4],本文所提的传感器灵敏度相差不大,但器件尺寸明显减少,便于封装。

波峰位置随待测液体折射率变化如图 3 所示,波峰漂移与待测液体折射率 n_a 成正比,波峰漂移的距离内不会出现其它波峰,不会带来波峰混淆的问题。波峰漂移距离与 n_a 变化量的关系比较简单,这是由于在仿真中多光束因为反射率较小可以简化为 2 束光干涉。相

图3 波峰位置随待测液体折射率 n_a 变化

对于常见的 F-P 腔干涉仪存在的多模、多光束干涉的情况,本文选取的参数使得通过波峰位置解调对应的待测液体折射率更加简单。

4 结束语

本文通过熔接 2 段光纤构成了 F-P 腔传感器。由于 F-P 腔反射率比较小,可以将复杂的多光束干涉简化为简单的双光束干涉。在探测器最小分辨率为 0.05 nm 时,本文所提折射率传感器的最小分辨率为 3.0135×10^{-4} 。尽管器件灵敏度和已有器件相差不大,但器件的尺寸远小于已有器件,便于传感器的封装与使用。折射率的差别与光纤半径共同决定了反射信号的强度。考虑到现实纤芯及包层的折射率变化是有限的,并且需要限制光纤的 V 值在单模光纤范围内,应该综合考虑反射率及 V 值来选择光纤参数。传感光纤会影响频率谱峰值间距,峰值间距过大或者过小都会影响计算,选取合适长度传感光纤来组成传感器是有必要的。由于传感光纤的长度对于传感器的最小分辨率没有影响,这大大减少了对于制作工艺的要求。因此,本文提出的基于 F-P 腔结构光纤传感器具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 李川,李英娜,万舟. 光纤传感器技术[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [2] 金龙,张伟刚,涂勤昌,等. 干涉技术在光纤传感器设计中的应用[J]. 激光与光电子学进展,2004(7):51-56.
- [3] WEI T, HAN Y, LI Y, et al. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[J]. Optics Express, 2008, 16(8): 5764-5769.
- [4] 阙如月,刘一,孙慧慧,等. 基于光纤内双开口 F-P 腔干涉腔的折射率传感器[J]. 激光技术,2014,38(6):780-784.