

全新的高灵敏度压力传感器

巴西的坎皮纳斯大学和空军研究所联合展开研究, 推出了新型光纤压力传感器的设计方案。

作者 LEXI CARVER

人们通常听到“光纤”这个词时, 首先浮现在脑海的可能是这样一幅画面: 细如发丝、扭曲成充满艺术感漂亮形状的发光物, 或者从灯座中喷涌而出的光之泉。这些能够传导光的二氧化硅光纤, 其用途可远远不止于装饰。光纤于上世纪五十年代被成功开发, 目前已广泛应用于电力传输、通信、成像和传感等领域。

具体来说, 光纤具有优良的介电属性和广泛的适用性, 因而可以在其他传感技术可能失效的环境中使用, 例如真空室和海底等极端环境。

» 从光纤传感器到压力传感器

标准光纤是专为电信设备而设计, 通常无法用于传感领

域。为了使光纤对所需参数足够敏感, 人们必须对其进行加工处理, 例如对光纤光栅进行刻印, 或者采用特制的微结构光纤。在高灵敏度压力传感器方面, 微结构光纤展现出了良好的应用前景。高灵敏度压力传感器可用于石油勘探等领域, 技术人员和工程师可以使用它来检测流体压力。图 1 展示了文献报道的三种可用作压力

传感器的光纤。

压力传感器中的微结构光纤通常具有特殊的构造, 外部施加的载荷会导致光纤内产生不对称的应力分布, 进而使光纤的双折射特性(一种使光束的折射率呈各向异性的材料属性)发生改变, 于是便可以通过测量双折射特性的变化来实现传感检测。

位于巴西的坎皮纳斯大学(Instituto de Estudos Avançados)的研究人员Jonas Osório表示:“光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰等优点, 并能适用于恶劣环境。同时它们体积小、重量轻, 较同类传感器而言有着更加广阔的适用范围。”

然而现有文献资料中报

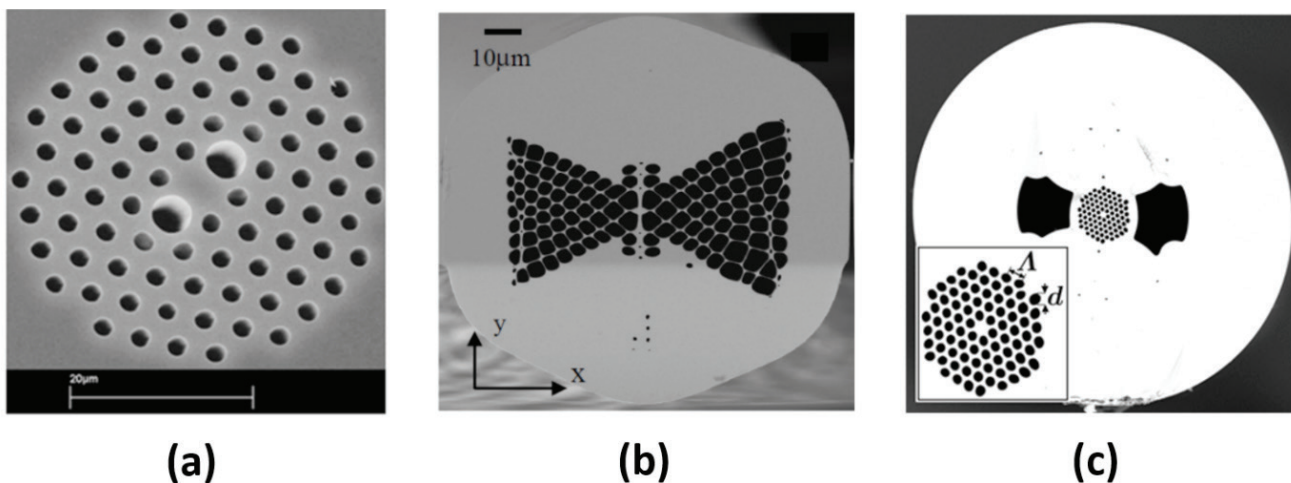


图 1. 压力传感测量装置中的微结构光纤。(a) 光子晶体光纤¹; (b) 带三角形格子孔的微结构光纤²; (c) 侧孔光子晶体光纤³。

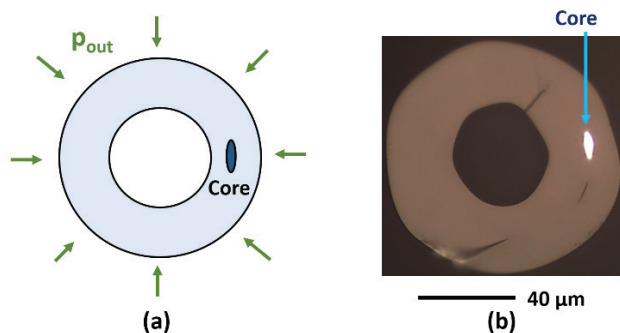


图 2. (a) 嵌入芯式毛细管光纤的概念图, 它显示了嵌有纤芯的毛细管在静水压力下的横截面。(b) 嵌入芯式光纤的横截面。

道的光纤, 其微观结构都相当复杂, 并且需要进行多次拉制, 然后由手工完成精密的结构组装。坎皮纳斯大学和空军研究所正在合作开发一种名为“嵌入芯式毛细管光纤”的特殊类型光纤, 它可以被用于制造高灵敏度的压力传感器。研发人员需要对这类光纤的制造工艺进行简化, 其中包括预成型制备法和直接拉丝法。

» 细致分析几何特征

嵌入芯式毛细管光纤本质上是一根二氧化硅毛细管, 管壁内区域(即纤芯)掺杂有锆(图 2 显示了光纤的结构和横截面图)。与图 1 中典型的压力传感器的微结构光纤相比, 嵌入芯式光纤的结构要简单得多。

空军研究所的研究人员 Marcos Franco 和 Valdir Serrão 与坎皮纳斯大学的 Jonas

Osório 和 Cristiano Cordeiro 合作, 对微结构光纤中由压力引起的双折射现象进行了研究, 据此提出了一种新的设计概念, 并对其进行了验证。他们的目标是设计出能感知静水压力的光纤, 静水压力指的是由静止液体产生的压力, 例如传感器周围的静水。他们在设计过程中使用毛细管光纤(极细的空心管)替代了包含气孔阵列的实心光纤, 以此来产生不对称的应力分布。

他们的目标是最大限度地增强由压力变化引起的双折射率变化, 由此提升光纤的传感能力。他们首先利用解析模型对压力引起的毛细管壁内的位移和机械应力进行了研究(图 3)。

解析模型表明, 由于毛细管结构本身的特性, 外加压力在毛细管内壁上产生了不对称的应力分布。在光弹

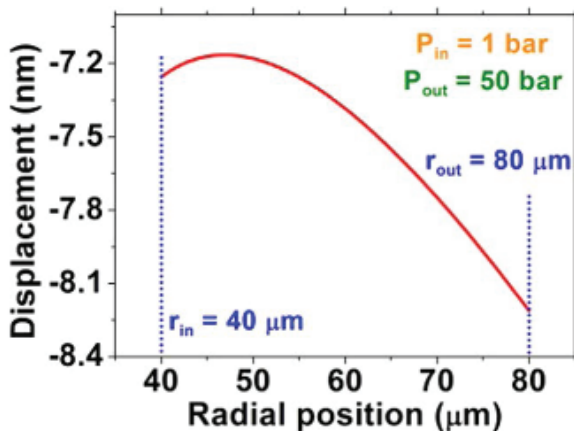


图 3. 研究受压的无内嵌芯毛细管光纤。在初始的位移曲线研究中, 内半径 $r_{in}=40\ \mu\text{m}$, 外半径 $r_{out}=80\ \mu\text{m}$, 内压 P_{in} 为 1 bar, 外压 P_{out} 为 50 bar。

性效应的作用下, 应力会引起材料折射率沿水平和垂直方向发生变化, 从而获得所需的双折射特性。

» 最大限度地提升对压力变化的敏感性

借助 COMSOL Multiphysics® 软件, Franco、Serrão、Cordeiro 和 Osório 向数学模型中添加了椭圆纤芯, 也就是石英毛细管壁中掺杂了锆的区域。通过运行仿真, 他们获得了模式双折射的变化方

式, 以及外加压力和毛细管壁内纤芯的位置之间的关系(图 4)。模式双折射描述了可以穿过纤芯的光学模式的双折射效应。

仿真模型可以计算基本模态在不同压力条件下的有效折射率。当入射的电磁波沿纤芯传播时, 便会出现这种模式。研究表明, 若想最大限度地提升双折射现象对压力的敏感性, 即增强传感器的灵敏度, 必须使纤芯完全嵌入毛细管结构, 并且靠

“ 光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰等优点, 并能适用于恶劣环境。”

—JONAS OSÓRIO, 巴西坎皮纳斯大学研究人员

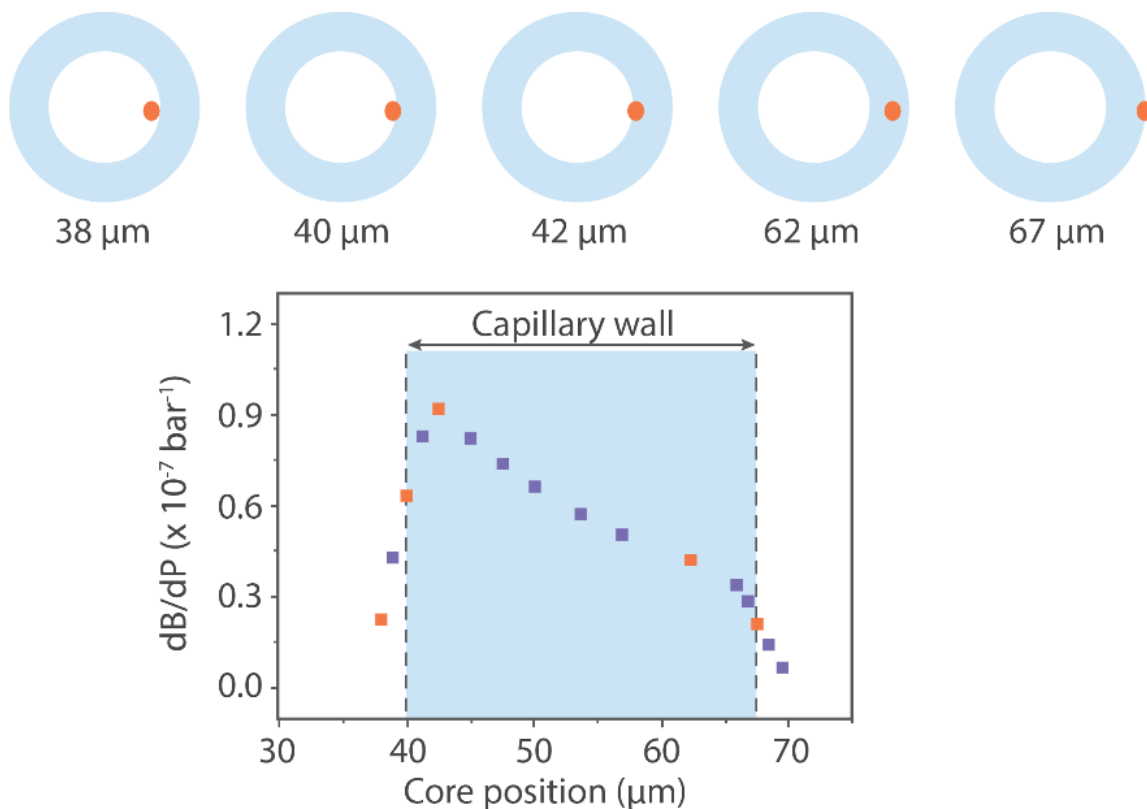


图 4. 模式双折射的变化与毛细管壁内纤芯的位置之间的函数关系。当纤芯非常接近光纤的内半径(顶部中间图)时,由压力变化引起的双折射变化最大。

近内壁。他们分析了不同几何结构中应力分布的变化,最终得出结论:光纤管壁越薄,纤芯位置越接近毛细管的内半径,由压力引起的双折射率的变化就会越大。

» 全新的微结构光纤传感器

在完成了有关双折射对压力的依赖性的研究后, Franco、Serrão、Cordeiro 和 Osório 提出了一种可以简化微结构光纤制造工艺的新方

法。经过验证的新型压力传感器设计可以正常工作。他们将概念设计的灵敏度与现有的复杂光纤结构进行了比较,确认新的设计方案可以产生相近的效果,但是能够减少复杂的组装工作。嵌入芯光纤为高灵敏度光纤压力传感器提供了一个全新的发展方向,相信在不远的将来,石油勘探者可以更加方便地对采集的石油进行实时评估。☉

参考文献

研究小组确定,可以将嵌入芯式光纤作为一种全新的简化压力传感器设计的发展方向。这项研究成果最近发表在自然出版集团旗下的《科学报告》上(nature.com/articles/s41598-017-03206-w)。

¹ H. Y. Fu, et al. "Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer," *Applied Optics*, 47, 15, 2835-2839, 2008.

² A. Anuskiewicz, et al., "Sensing characteristics of the rocking filters in microstructured fibers optimized for hydrostatic pressure measurements," *Optics Express*, 20, 21, 23320-23330, 2012.

³ J. H. Osório, et al., "Photonic-crystal fiber-based pressure sensor for dual environment monitoring," *Applied Optics*, 53, 17, 3668-3672, 2014.