

全光纤保偏声光调制器的研究与应用

徐 曜,裴 丽,李卓轩,刘 超

(北京交通大学 光波技术研究所,全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044)

摘 要:全光纤保偏声光调制器(PAOM)是光传感和光通信系统的重要组成部分。理论分析了全光纤保偏声光调制器两正交偏振轴的光能量转换机理及耦合效率,讨论了在扭转声波作用下,两种全光纤保偏声光调制器的结构和调制原理。最后讨论了这种调制器在温度、应变及气体检测中的应用,并讨论了其优缺点。

关键词:声光调制器;能量耦合效率;扭转声波;传感器

中图分类号:TN253

文献标识码:A

The Research and Application of Polarization All-fiber Acoustooptic Modulator

XU Yao, PEI Li, LI Zhuoxuan, LIU Chao

(Key Lab. of All Optical Network and Advanced Communication Networks, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The polarization all-fiber acoustooptic modulator (PAOM) is the key component for optical sensors and optical communication system. The transformation principle and coupling efficiency of optical energy transferred between two orthogonal polarization axes of PAOM are analyzed theoretically. The structure and modulation theory of two kinds of PAOMs, interacted with torsional acoustic wave, are discussed. The applications of this kind of modulator in sensing area are discussed.

Key words: acousto-optic modulation; energy coupling efficiency; torsional acoustic wave; sensors

0 引言

全光纤声光调制器(AOM)由于其插入损耗低,宽带连续电调谐,波长调谐范围宽,滤波带宽窄,调谐速度快及多波长独立作用的特点,在波分复用(WDM)网络中得到广泛应用。基于模式耦合原理的AOM包括两类:

1) 扭转声波调制。利用超声波在光波导中产生光弹效应,引起光波导折射率发生周期性变化,使双折射光纤中偏振模之间发生耦合。

2) 弯曲声波调制。利用超声波使光纤发生周期性微弯,引起基模和高阶模及辐射模之间的耦合。

本文介绍的全光纤保偏声光调制器(PAOM)是第1)类,即基于扭转声波的AOM,相对于第2)类AOM,它具有无声学双折射,旁瓣衰减快^[1],可通过简便方法在陷波滤波器和带通滤波器间转换^[2],受类似物理接触、光纤微弯等外加扰动影响小^[3],操作无偏振依赖^[4],相对较低的强度波动等。与第2)类相比,光能量从纤芯模耦合到包层模后从

包层模泄露而不可收集的AOM,PAOM中光的能量耦合产生在两偏振轴之间,从另一个偏振轴上可获得转换后的光能量也是PAOM的重要优势之一。

早在1902年,Brillouin就预言了声光互作用现象,1932年,Lucash Biquard、Sears、Deby等分别用实验验证了这一现象。1969年,Stanford大学的Harris和Wallace等首次提出声波与光波互作用以达到滤波的目的。目前这种器件在动态掺铒光纤放大器、增益均衡器、可调谐激光器中均已应用。基于这种机理的光开关、频移器、调制器也时有报道。

本文分析了PAOM的声光调制原理,介绍了PAOM的结构,着重讨论了PAOM在温度传感、气体浓度传感和应力传感方面的应用,并分析了其相对于其他光纤传感器的优缺点。

1 原理

PAOM器件是基于在光纤中传播的光场的多个空间模式间的声光耦合作用制成,这种耦合常带有波长的选择性。其原理可通过引入“超声光栅”的

收稿日期:2012-08-11

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2011YJS210)

作者简介:徐曜(1991-),女,山东人,主要从事光交换方面的研究。E-mail:09211145@bjtu.edu.cn。通信作者:裴丽(1970-),女,教授,博士,主要从事光纤通信、光纤传感、光器件、ROF、光网络关键技术的研究。E-mail:lipei@bjtu.edu.cn。

概念进行解释。当超声波在介质中传播时,将对介质的密度产生微小的周期性扰动,从而导致介质的折射率发生微小的周期性变化。可将这种折射率的周期性变化认为是空间一系列以声速运动的反射镜,光在介质中传播时,被这些反射镜反射,使相位发生周期性变化,因此称为超声光栅。扭转声波在光纤中传播时产生的超声光纤光栅是写在保偏光纤(PMF Polarization)上的长周期光栅,它以一定角度周期性的扭转光纤主轴,使光的偏振态在纤芯模的两个正交简并模间转换,若满足相位匹配条件,则光波的能量会在波长 λ_B 处转换到同一模式的另一偏振态:

$$\Lambda_g = L_B = \lambda_B / \Delta n \quad (1)$$

式中: L_B 为保偏光纤两偏振模间的拍长; Δn 为保偏光纤两光轴的有效折射率差; Λ_g 为超声光栅周期,若声波波长、声波波速(光纤中扭转声波的波速约为 3.7674×10^3 m/s)和声波频率分别记为 λ_s 、 v_s 和 f_s ,则

$$\Lambda_g = \lambda_s = v_s / f_s \quad (2)$$

由式(1)、(2)可见,声光调制器中的谐振波长可通过改变加载声波的频率连续调整。

两正交偏振态的功率耦合系数为

$$\kappa = 2\pi \frac{\Phi}{L_B} \left(1 + \frac{1}{2} n^2 p_{44}\right) \quad (3)$$

式中: Φ 为光纤横截面的角位移; n 为折射率(熔融石英 $n=1.46$); p_{44} 为光弹性张量。式(3)中第一项所表示的折射率变化,来自于高折射率光纤中的周期性角位移所引入的入射 LP_{01} 模的两偏振本征模间的扰动。第二项所表示的折射率变化,来自于周期性扭转的光纤中的拉伸所致的弹光效应。计算可得此项值为 -0.08 ,削弱了模式耦合。由此可见,促进最低阶扭转声波模式耦合的最主要原因是光纤的几何扭转,但与此同时,几何扭转带来的弹光效应也削弱了8%的声光耦合。

因此,PAOM中两偏振轴间的光能量耦合效率可通过改变声波强度进行调整。

2 PAOM结构及在传感中的应用

2.1 PAOM结构

PAOM主要结构如图1所示。发射端在宽带光源(这里使用LED)的输出端放置一个偏振片作为起偏器,要求偏振片的偏振方向与 LP_{01} 模的一个偏振态对齐,宽带光源发出的光经过起偏器后形成

线偏振光并耦合进光纤。为避免声波对光源的影响,经过一段距离后,再将换能器产生的扭转声波耦合进光纤,与光波一同在光纤中传播合适的距离,发生声光相互作用。经过声调制的光发生了偏振模间的耦合,最后,在相互作用区域的末端用声衰减器对声波进行衰减(以避免声波对光谱检测的干扰),在输出端放置一个偏振片作为检偏器,通过改变偏振片的偏振方向,并用光谱仪对经过检偏器后的光波进行接收和检测,即可得到不同类型的滤波器。当输出偏振片与输入偏振片偏振方向相同时(见图2(a)),声光调制器可用作高通滤波器;当输出偏振片与输入偏振片偏振方向正交时(见图2(b)),可用作低通滤波器。

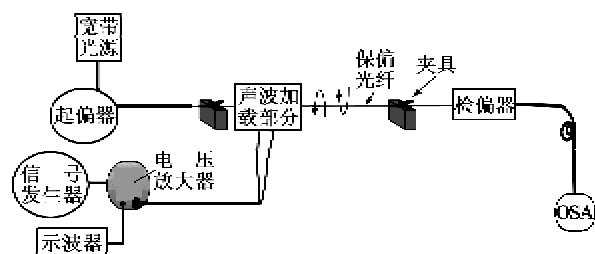


图1 PAOM结构

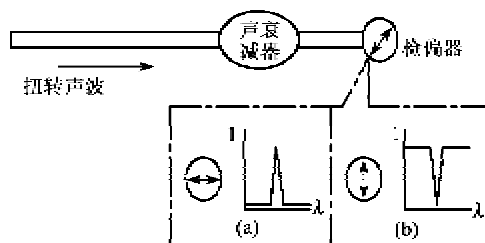


图2 检偏器方向与输出光谱的关系

上述过程中,核心步骤是扭转声波的产生和耦合。图3为采用侧边光纤法产生和耦合扭转声波的换能器。图4为剪切式压电陶瓷法产生和耦合扭转声波的换能器。

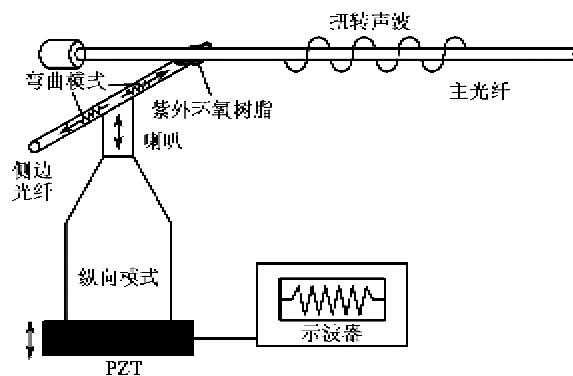


图3 侧边光纤型扭转声波换能器

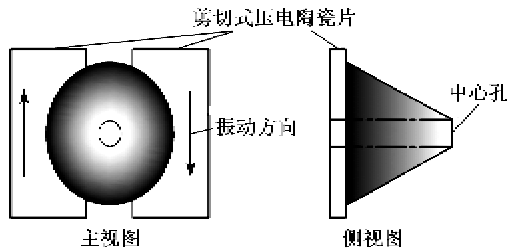


图4 剪切式压电陶瓷法产生和耦合扭转声波的换能器结构

2.1.1 侧边光纤型扭转声波换能器

采用侧边光纤法产生和耦合扭转声波的换能器结构图如图1所示。纵向振动换能器的输出端和与其振动方向垂直的侧边光纤相连接,将锥体中的纵向模式转换成光纤中的弯曲模式,射频(RF)信号驱动厚度振动的压电陶瓷(PZT)在锥体中激励起纵向声波,耦合到长度为4 mm的侧边光纤中转换成弯曲声波^[5]。侧边光纤的一个末端用紫外环氧树脂粘在传感光纤(主光纤)上。通过这种结构,侧边光纤上的弯曲声波被转换为主光纤上的扭转声波,为了减少声波的衰减,侧边光纤和传感光纤都是除去涂覆层的直径 $\varnothing 125\ \mu\text{m}$ 的裸纤。

2.1.2 剪切式压电陶瓷法产生和耦合扭转声波的换能器

采用剪切式压电陶瓷法产生和耦合扭转声波的换能器结构图,如图2所示,其由2个剪切式压电陶瓷片和一个角放大器构成。2个剪切式压电陶瓷片用氧环胶粘剂粘在角放大器的末端(见图3)。裸纤从换能器的中心孔穿过,两压电陶瓷片以 180° 的相位差反相振动。产生的扭转声波耦合进裸纤。

上述两种结构在保偏声光滤波器(PAOTF)中均有应用,且各有优势。侧边光纤结构无需对PZT打孔,但耦合效率较低。剪切式结构提高了耦合效率,但两PZT片难以保证完全反相。

2.2 PAOM在传感中的几个应用

2.2.1 PAOM在分布式温度传感中的应用

现有的分布式光纤温度传感器主要有两种:

1) 基于光纤中的散射原理制成的全分布式光纤温度传感器。

2) 基于光纤光栅的准分布式全光纤温度传感器,如光纤光栅温度传感器。两者各有优势,但全分布式光纤传感器造价更低,由于此类传感器基于散射原理制成,而光纤中的散射(包括瑞利散射、布里渊散射和喇曼散射)强度都很低,因此其灵敏度远小于单点的准分布式光纤传感器;准分布式全光纤温度传感器(如光纤光栅传感器)虽然传感灵敏度更

高,但用其实现高分辨率的高速传感系统,则相对造价较高。

本文介绍使用PAOM实现温度传感的方法,结合了上述两种传感方式的优势,既有较高的灵敏度,造价也较低。其原理如下:

将传感光纤置于所要测量的环境中。当温度变化时,超声光栅的简谐波长发生变化,且变化遵循以下规则:

$$\frac{d\lambda_r}{\lambda_r \cdot dT} = \frac{dB_r}{B_r \cdot dT} + \frac{dv_a}{v_a \cdot dT} \quad (4)$$

式中: λ_r 为共振波长; B_r 为光纤的双折射; T 为温度; v_a 为光纤中扭转声波的波速。利用此性质可将PAOM用作全分布式全光纤温度传感器,实验表明,当用传感光纤长度为3 m时,灵敏度高达 $100 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[6]。另外,温度变化时,此类声波引入超声光栅中不仅发生了双折射的变化(见式(4)右边第一项),也发生了声波波速的变化(见式(4)右边第二项),相对于传统的只能产生双折射变化的永久写入型超声光栅,此类传感器的灵敏度也更高。

2.2.2 PAOM在气体浓度检测中的应用

相对于电类传感器,光纤气体传感器以光作为被测量的信号载体,有抗干扰性强、对测量对象影响较小的等诸多优势,适合于测量易燃易爆气体或工作于易燃环境及强电磁干扰环境。另外,它还具有灵敏度高,频带宽,动态范围大,传感单元结构简单,造价低,易于构成网络,与光纤遥测技术相配合可实现大容量、远距离测量与控制等诸多优点,在检测气体浓度的领域中已得到广泛应用。

本文介绍的PAOM在气体浓度检测中的应用实质上是PAOM温度传感的扩展应用。下面以氢气的检测原理为例进行说明:

已知氢气和氧气的反应是放热反应,且这一化学反应放出的热量与氢气浓度成正比,因此可巧妙地将氢气浓度的测量转换为温度的测量。又因常温下氢气与氧气反应极不明显,导致温度变化很小,所以需对传感器进行结构上的改良。针对氢气和氧气的这一反应,我们可在传感光纤的表面涂覆一层金属铂,由于金属铂对氢气和氧气的反应有催化作用,导致同等氢气浓度差下的温度变化量加大,提高了传感的灵敏度。实验表明,此种方法的温度灵敏度高达 $1\ 000 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[7]。对于其他气体,我们也可利用此原理,通过使用相应的涂覆材料进行测量。

现有光纤气体浓度检测传感装置种类繁多,光谱吸收型光纤气体传感器是目前研究最广泛的一种

光纤传感器,基于气体分子在近红外区对光谱的选择性吸收特性制成,有极高的灵敏度,快速的响应速度及极高的气体鉴别能力。相比较而言,光谱吸收型气体传感器可同时测量未知气体的组成成分和浓度。本文介绍的基于PAOM的光纤温度传感,是在已知气体成分的基础上,根据待测气体的特定化学反应设计传感器结构,测量气体浓度,虽然只能对已知气体进行浓度监测,但具有针对性强,灵敏度高及解调简单等优点。

2.2.3 PAOM在应变传感中的应用

将PAOM应用于应变传感时,系统中引入的应力对光纤和声波同时产生影响,导致传感器输出光谱中简谐波长的漂移,在圆柱型光纤中引入恒定拉力作用时,这种漂移为

$$G' \left(\frac{\partial^2 U_\theta}{\partial r^2} - \frac{U_\theta}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial r} \right) + \left(G' - \frac{T}{2} \right) \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial z^2} = \rho' \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中 G 和 U_θ 分别为光纤截面的剪切模量和角位移。根据横向应变系数的定义, $\partial a / \partial l = -\delta(a/l)$, 应力带来的密度变化为

$$\rho' = \rho + \sigma \rho = \rho(1 + \epsilon - 2\delta\epsilon) \quad (6)$$

式中 ρ 和 ϵ 分别为光纤的密度及所受的轴向应力。

综上所述可知,应力作用下光纤中最低阶扭转声波模式的传播速度为

$$\frac{v'}{v} = \frac{1 + \epsilon}{\sqrt{1 - \epsilon + 2\delta\epsilon}} \quad (7)$$

由于 $v = \Lambda f$, 波长的变化为

$$\frac{\partial \Lambda}{\Lambda} = \frac{1 + \epsilon}{\sqrt{1 - \epsilon + 2\delta\epsilon}} - 1 \quad (8)$$

以上结论均是在光纤具有良好均匀性的假设之上得到,不完全适用于双折射光纤。椭圆光纤中应力引入的双折射在文献[8]中有所研究,但只考虑了几何变化的影响。然而,在双折射光纤的横截面上分布有应力区,应力区随外界应力的变化情况复杂,Kwang Jo Lee 等通过实验得出,应力引入的拍长变化为

$$\frac{\partial L_B}{L_B} = \epsilon_m - m \frac{L_B}{l} \quad (9)$$

式中: ϵ_m 为轴向应力; l 为光纤的长度。

根据以上原理,可将PAOM应用于应变的传感。但其复杂的传感原理导致输出光谱的分析难度增加,相对于常用的光纤光栅应变传感器,应用极少。然而,由于它是全分布式传感,且结构相对简单,仍值得深入研究。

单,仍值得深入研究。

3 总结及展望

与全光纤弯曲声波调制器相比,PAOM具有许多优势。本文分析了PAOM两正交偏振轴的光能量转换机理及耦合效率,介绍了PAOM的一般结构及工作原理,当改变检偏器的偏振角度时,获得了对应于不同偏振态的输出光,可用来制作不同用途的滤波器。然后对比了在扭转声波作用下,两种PAOM结构的优缺点。最后讨论了这种调制器在分布式温度检测、气体浓度检测及应变传感中的应用。PAOM作为一种新兴的滤波器或传感器,以其宽调谐范围,高响应灵敏度,必将在光纤通信及光纤传感领域发挥重要的作用。

参考文献:

- [1] LEE K J, HWANG I K, PARK C H, et al. Sidelobe suppression in all-fiber acousto-optic tunable filter using torsional acoustic wave[J]. Optics Express, 2010, 12(18): 12059-12064.
- [2] LEE K J, PARK C H, PARK H S, et al. Highly efficient all-fiber tunable polarization filter using torsional acoustic wave[J]. Optics Express, 2007, 19(15): 12362-12367.
- [3] LEE K J, HWANG I K, PARK C H, et al. Polarization-coupling all-fiber acousto-optic tunable filter insensitive to fiber bend and physical contact[J]. Optics Express, 2009, 8(17): 6096-6100.
- [4] LEE K J, HWANG I K, PARK C H, et al. Polarization-independent all-fiber acousto-optic tunable filter using torsional acoustic wave[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 8(22): 523-525.
- [5] 刘国祥, 胡力, 叶昆珍. 用于光纤声光器件的超声换能器与模式转换器[J]. 压电与声光, 2006, 28(3): 275-277.
- [6] LIU Guoxiang, HU Li, YE Kunzhen. Ultrasonic transducer and mode-conversion system for optical fiber acousto-optic device[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(3): 275-277.
- [7] WANG D Y, WANG Yunmiao, GONG Jianmin, et al. Fully distributed fiber-optic temperature sensing using acoustically-induced rocking grating[J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3392-3394.
- [8] WANG D Y, WANG Yunmiao, GONG Jianmin, et al. Fully distributed fiber-optic hydrogen sensing using acoustically induced long-period grating[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2011, 23(11): 733-735.
- [8] HUANG Shangyuan, BLAKE J N, KIM B Y. Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers[J]. Lightwave Technology, Journal of, 1990, 8(1): 23-33.