

双芯光纤的应用及研究进展

陈曼雅,冯素春,任国斌

(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:双芯光纤是一种具有特殊折射率分布的特种光纤,基于双芯光纤制作的光纤器件被应用于多个领域。首先介绍了双芯光纤的发展历史,然后阐述了双芯光纤的种类及其基本特点,并重点叙述基于双芯光纤的耦合型滤波器和 Mach-Zehnder 干涉仪滤波器的原理及其改进技术,同时也介绍了它的其他应用,最后进行小结。

关键词:双芯光纤;滤波器;干涉仪;光纤传感

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.002

Development and application of dual-core fiber

CHEN Man-ya, FENG Su-chun, REN Guo-bin

(Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The dual-core fiber is a special optical fiber, which has the special refractivity distribution, and the devices based on dual-core fiber are applied in many fields. The development of dual-core fiber is introduced briefly, then the types of dual-core fiber and its basic characteristics are described. Moreover, the principle of coupling filters and interferometers based on dual-core fiber and their improved technology are introduced emphatically, and other applications are introduced. Finally a conclusion is given.

Key words: dual-core fiber; filter; interferometer; fiber sensor

1 双芯光纤的发展

双芯光纤是一种具有特殊折射率分布的特种光纤,它突破了常规光纤的折射率分布结构,在同一根光纤中排布了两根相互平行的纤芯,既可以作为光传输介质,又可构造新的光器件。20世纪60年代初期,就有学者研究光在两个平行波导间的能量耦合。1980年,双芯光纤的实验验证使耦合模理论得到重大突破。1981年,研究人员利用双芯光纤对弯曲波导耦合特性的测量以及耦合系数与弯曲半径间的关系,设计出光纤型光方向耦合开关。80年代末,研究人员利用双芯光纤对波长和偏振态的选择性以及光谱特性,把双芯光纤初步应用于光传感器,包括温度、应力和位移的测量。随后双芯光纤的非线性效应也被研究,用于实现被动锁模器件和超快速全光开关^[1]。基于双芯光纤制作的光纤器件,

具有器件尺寸易精确控制、耦合区机械应力小、更加紧凑稳定和不易受外界影响等优点,在光传感和光通信等多个领域得到了广泛的应用,主要体现在光纤滤波器、光干涉仪、光连接器、光纤放大器、光分复用器、光纤开关、光学镊子和光纤传感器等方面。因此研究双芯光纤具有重要的理论和实际意义,随着研究的深入必将会给光纤通信和光纤传感带来新的突破。

2 双芯光纤的分类

双芯光纤在包层中存在两个纤芯,属于特种光纤。从光波导的物理结构出发,双芯光纤主要分为

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61107094)资助。

作者简介:陈曼雅(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为特种光纤及光纤激光器。E-mail: che-cherry@163.com

收稿日期:2012-12-05;修订日期:2012-12-18

同轴双芯光纤和非同轴双芯光纤。近年来也出现了光子晶体双芯光纤、带状双芯光纤和双子芯光纤。

2.1 同轴双芯光纤

同轴双芯光纤,也称作双包层光纤或双环芯光纤,即包层中的两个芯子在以包层圆心为轴线的同一轴线上,表现为内外两个芯子的结构,其结构如图1所示。同轴双芯光纤常用于制作大功率的光纤激光器^[2]。

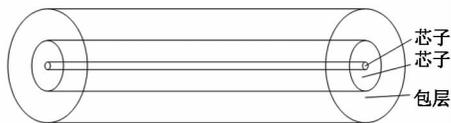


图1 同轴双芯光纤的结构示意图

2.2 非同轴双芯光纤

非同轴双芯光纤在一个在包层中存在两个独立芯子的光纤,其结构如图2所示。根据两个芯子的位置分布,非同轴双芯光纤可分为轴对称(相对于光纤包层的圆心)的非同轴双芯光纤和轴偏移的非同轴双芯光纤。轴对称的非同轴双芯光纤,两个芯子对称于波导中心,其横截面结构如图3所示。

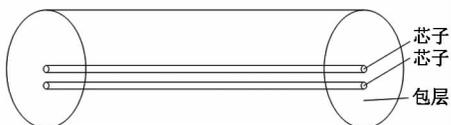


图2 非同轴双芯光纤的结构示意图

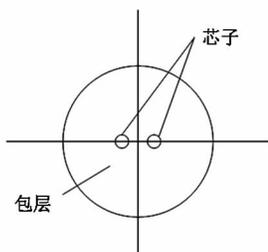


图3 轴对称非同轴双芯光纤横截面结构

轴偏移的非同轴双芯光纤的两个芯子仍是平行芯,但是两个芯子的对称轴向光纤一侧偏移。典型的例如可以使其中一个芯子正好位于整个双芯光纤的中轴上,如图4所示^[3]。另外,如果双芯光纤的两

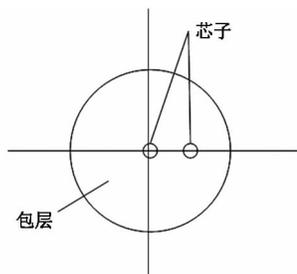


图4 轴偏移非同轴双芯光纤横截面结构

个芯子折射率及形状相同,可称为匹配双芯光纤^[4]。如果两个芯子的折射率及形状不相同,则可称为失配双芯光纤^[4]。

2.3 双芯光子晶体光纤

光子晶体光纤是由一种单一介质(通常为石英玻璃)构成,在二维方向上呈现周期性紧密排列(如周期性六角形等),而在光纤轴向基本保持不变的波长量级空气孔所构成的微结构包层的新型光纤。近年来,双芯光子晶体光纤也是光子晶体光纤的研究热点之一,主要体现在其耦合特性与其在色散和色散斜率补偿的应用^[5]。一般双芯光子晶体光纤^[6]的横截面结构如图5所示,光纤的双芯由除去中心孔两侧的空气柱形成,属于非同轴双芯光纤。环双芯光子晶体光纤用于制作新型的模式干涉仪^[7],也是研究的热点之一,其结构如图6所示,属于同轴双芯光纤的一种。

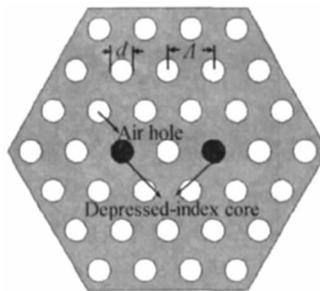


图5 双芯光子晶体光纤^[6]

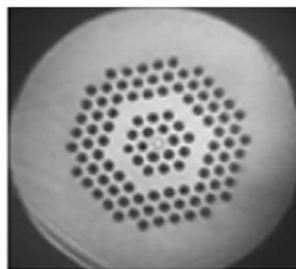


图6 环双芯光子晶体光纤^[7]

2.4 带状双芯光纤

带状双芯光纤是一种新型特种光纤^[8],其横截面结构如图7所示。带状双芯光纤的两根纤芯分布在内部,而包层较薄,整体的光纤截面近似矩形。带状双芯光纤可以直接当作双芯光纤使用,制作成多

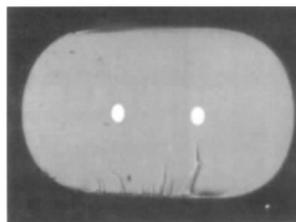


图7 带状双芯光纤横截面^[8]

种光纤传感器和光纤器件。在纤芯中掺杂增益物质和包层由高分子聚合物制作的带状双芯光纤,则可类似为双包层光纤。

2.5 双子芯光纤

双子芯光纤由两个邻近的分支波导通过一个共同的薄边缘相粘绑定在一起,其横截面结构如图8所示;每个分支波导的形状和尺寸与标准的单模光纤相同。双子芯光纤能够使每个分支波导的独立尾纤的输入输出实现低插入损耗,通过熔融拉锥的方法,可以制作成热平衡和机械耦合稳定的干涉仪^[9]。

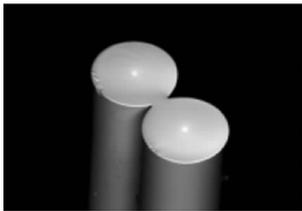


图8 双子芯光纤横截面^[9]

3 双芯光纤的应用

大多数用途的双芯光纤都是基于双芯光纤两个纤芯间的模式耦合效应。通过单模光纤和双芯光纤的连接,可制作出高性能的紧凑的全光纤耦合型滤波器,紧凑的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪,紧凑的全光纤 Michelson 干涉仪。下面重点介绍基于非同轴双芯光纤的耦合型滤波器和 Mach-Zehnder 干涉仪的原理及其应用设计,同时介绍双芯光纤在光连接器、光纤放大器、光分插复用器、光开关、光学镊子、光纤传感方面的应用。

3.1 耦合型滤波器

3.1.1 原理

根据耦合模理论^[10]的推导,当双芯光纤的两个纤芯完全相同时,即形状和折射率一样,纤芯1和纤芯2中光波的幅度可分别表示为:

$$A_1(z) = R_0 \cos(Kz) \exp(-iMz) \quad (1)$$

$$A_2(z) = -iR_0 \sin(Kz) \exp(-iMz) \quad (2)$$

式中, R_0 为纤芯1的入射光振幅; K 为双芯光纤两芯之间的互耦合系数; M 为双芯光纤每个芯子的自耦合系数。

而纤芯1和纤芯2中光波的传输功率:

$$P_1(z) = R_0^2 \cos^2(Kz) \quad (3)$$

$$P_2(z) = R_0^2 \sin^2(Kz) \quad (4)$$

当 $\sin^2(KL) = 1$ 时,有:

$$P_{2\max} = R_0^2 \quad (5)$$

$$P_{1\min} = 0 \quad (6)$$

令 $L_0 = \frac{\pi}{2K}$ 为耦合长度,即纤芯2的功率第一次

达到最大值时的传输距离。当双芯光纤的长度为耦合长度的奇数倍时,纤芯2的输出光功率获得最大值,并等于纤芯1的输入功率。此时纤芯1的输出功率为0,即在 $z=0$ 处从纤芯1输入的光功率全部在 $z=L$ 处从纤芯2输出。如图9所示,纤芯1的输出功率呈现正弦曲线形变化,而纤芯2的输出功率呈现出与纤芯1输出功率曲线互补余弦曲线形变化规律。

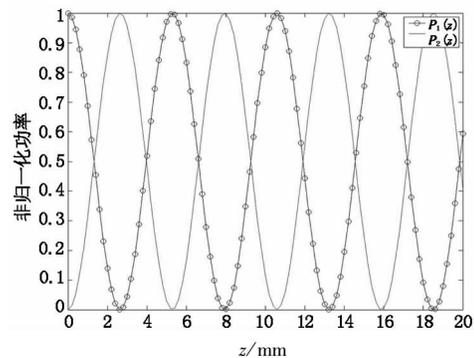


图9 双芯光纤的纤芯输出功率

3.1.2 基于轴对称双芯光纤的耦合型滤波器

根据上述原理,研究者们提出基于轴对称双芯光纤的耦合型滤波器^[11],其结构如图10所示,该滤波器将两根普通单模光纤的芯子分别和一段长度为 L 的两个纤芯相同的轴对称的非同轴双芯光纤的中心熔接在一起,再将两根单模光纤分别与宽带光源和光谱分析仪相接,通过光谱分析仪则可观察滤波器的梳状谱。基于双芯光纤耦合型的滤波器结构简单,制作容易,但是由于轴对称双芯光纤与单模光纤的模场不匹配,会影响滤波器的耦合效率以及插入损耗。

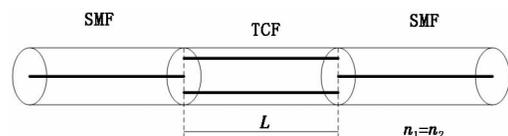


图10 基于轴对称双芯光纤的滤波器

3.1.3 改进的基于轴对称双芯光纤的耦合型滤波器

为减小插入损耗,研究者们提出了一种改进的基于轴对称双芯光纤的耦合型滤波器^[11],其结构如图11所示。该滤波器通过在线监测滤波器输出功率的方法,将两根普通单模光纤的芯子通过错位方式分别和一段长度为 L 的两个纤芯相同的轴对称的非同轴双芯光纤的其中一个纤芯熔接在一起。这种滤波器插入损耗较小,但是需要分别精密对准单模光纤与双芯光纤的其中一个芯子,花费较长时间,仍

然存在一定的难度。

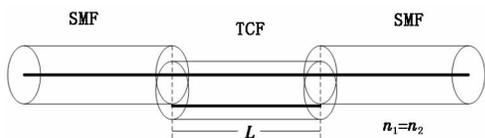


图 11 改进的基于轴对称双芯光纤的耦合型滤波器

3.1.4 基于轴偏移双芯光纤的耦合型滤波器

为解决以上问题,这里提出基于轴偏移双芯光纤的耦合型滤波器,其结构如图 12 所示。该滤波器将两根单模光纤的芯子分别和一段长度为 L 的两个纤芯相同的轴偏移双芯光纤的中心纤芯熔接在一起。由于单模光纤和轴偏移双芯光纤的中心纤芯的波导对称性,这种滤波器有利于双芯光纤与单模光纤纤芯接续点的对准进行模场匹配,制作时间较短,能够减小单模光纤和双芯光纤之间的插入损耗,从而提高整个滤波器的性能。

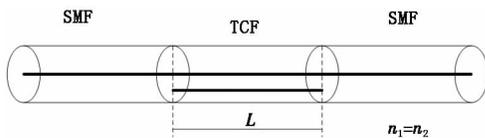


图 12 基于轴偏移双芯光纤的耦合型滤波器

3.2 Mach-Zehnder 干涉仪

3.2.1 原理

双芯光纤的耦合程度受纤芯间的纤芯距、半径差和折射率差影响^[12]。当选用的双芯光纤的两个纤芯间的半径或者折射率不同,同时两个纤芯之间的纤芯距较大,两个纤芯之间的耦合程度非常弱,几乎没有功率交换。

根据干涉原理,可得到马赫-曾德尔干涉仪的输出功率:

$$P_o = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos \Delta\phi \quad (7)$$

式中, P_1 和 P_2 为双芯光纤的两个纤芯的两路信号分别耦合到单模光纤的光功率; $\Delta\phi$ 为两个纤芯的两路信号的相位差:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{eff1}} L_1 - n_{\text{eff2}} L_2) \quad (8)$$

式中, L_1, L_2 分别为双芯光纤的两个纤芯的长度; n_{eff1} 和 n_{eff2} 分别为双芯光纤的两个纤芯的有效折射率。其中, $L_1 = L_2 = L$, 令 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}}$ 为两个纤芯之间的有效折射率差, 则:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} L \quad (9)$$

当 $\Delta\phi = 2m\pi, m$ 为整数:

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda} = m \quad (10)$$

此时输出功率 P_o 达到最大:

$$P_{\text{max}} = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \quad (11)$$

当 $\Delta\phi = (2m - 1)\pi$:

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda} + \frac{1}{2} = m \quad (12)$$

输出功率 P_o 最小:

$$P_{\text{min}} = P_1 + P_2 - 2\sqrt{P_1 P_2} \quad (13)$$

图 13 为干涉仪的典型理想梳状传输谱。

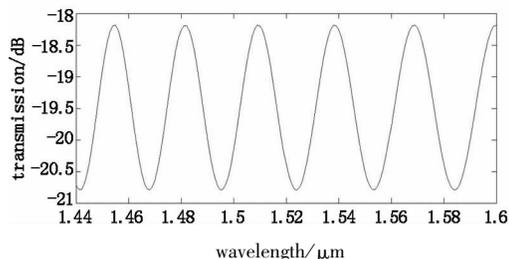


图 13 干涉仪的理想传输谱

3.2.2 基于轴对称双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪

根据上述原理,研究者们提出基于轴对称双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪^[4],其结构如图 14 所示。该干涉仪将两根普通单模光纤的芯子分别和一段长度为 L 的两个纤芯折射率不相同(即失配双芯光纤)的轴对称的非同轴双芯光纤的中心熔接在一起。双芯光纤的两个纤芯因存在差异而产生有效折射率差使光信号在两个纤芯传输时产生相位差,在两路光信号耦合到单模光纤时发生干涉。这种干涉仪结构简单,制作容易,但是单模光纤与双芯光纤熔接处由于模场不匹配而插入损耗较大。

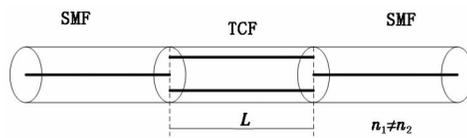


图 14 基于轴对称双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪

为了解决上述干涉仪中插入损耗的问题,研究者们提出了一种改进的基于轴对称双芯光纤 Mach-Zehnder 干涉仪^[1],其结构图如图 15 所示。该干涉仪在两处单模光纤与双芯光纤熔接的位置分别进行熔融拉锥使单模光纤和双芯光纤的模场实现较好的匹配^[13],但是利用这种方法进行熔融拉锥的精确位置不容易确定。

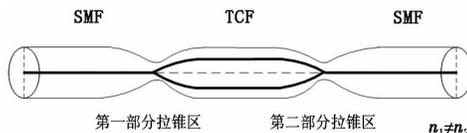


图 15 优化的基于轴对称双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪

3.2.3 改进的基于轴对称双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪

另一种改进的基于轴对称双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪^[4],其结构如图 16 所示。该干涉仪将两根普通单模光纤的芯子通过错位方式分别和轴对称的非同轴双芯光纤的其中一个纤芯熔接在一起,并在双芯光纤上选择两处合适的位置进行拉锥。这种方法需要精密对准单模光纤与双芯光纤的其中一个芯子,花费较长时间,仍然存在一定的难度。

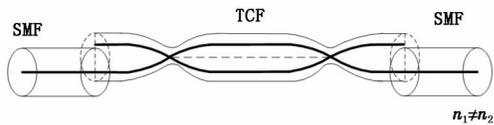


图 16 改进的基于轴对称双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪

3.2.4 改进的基于轴偏移双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪

由于实际操作中不能确保控制双锥区域光纤具有良好的形状对称性的问题,我们在此提出一种改进的基于轴偏移双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪,其结构如图 17 所示。该干涉仪将两根普通单模光纤的芯子分别和轴偏移的非同轴双芯光纤的中心纤芯熔接在一起,并在双芯光纤上选择两处合适的位置进行熔融拉锥。这种滤波器有利于双芯光纤与单模光纤纤芯接续点的对准,制作时间较短,能够减小单模光纤和双芯光纤之间的插入损耗;同时能够很好地控制两个芯子间的能量耦合,从而提高整个滤波器的性能。

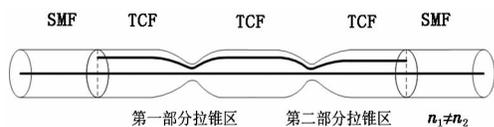


图 17 基于轴偏移双芯光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪

3.3 光连接器

光连接器的主要用途是用以实现光纤的接续。研究者们提出一种新型的基于双芯光纤的连接器^[14],其结构如图 18 所示。将轴对称的非同轴双芯光纤 (TCF) 连接到两对芯子的相速度不一致的非

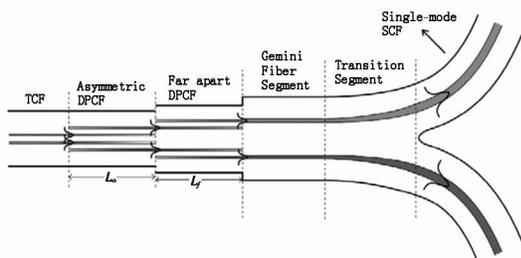


图 18 双芯光纤到单模光纤的连接器示意图^[14]

对称的双对芯光纤(DPCF),经过远端的 DPCF 和双芯光纤最终分别与两个单模光纤连接。此光连接器因低损耗和低信号串扰的特征,有良好的应用前景。

3.4 光纤放大器

基于双芯光纤制作的掺铒光纤放大器,可自动提供信道功率均衡,忽略放大器之间的损耗变化和信号的瞬态交叉饱和^[15]。该器件主要利用了信道的空间分离作用和铒离子与功率相关的饱和特性。在双芯掺铒光纤均衡放大器中,两纤芯均为 Er³⁺ 掺杂。研究者们提出一种增益平坦的双芯掺铒光纤放大器^[16],其结构如图 19 所示。此放大器能在一定程度实现输出功率均衡,适合未来通信发展中多信道多级放大波分复用光纤系统和网络的要求。

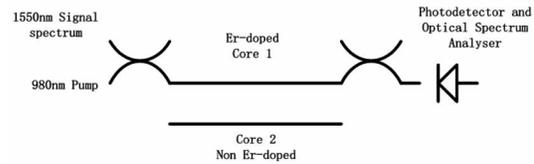


图 19 增益平坦的双芯掺铒光纤放大器

3.5 光分插复用器

光分插复用器的作用是上传和下载信号的节点,是长途干线网和城域网的重要组成部分。研究者们提出一种基于双芯光纤的分插复用器^[17],其结构如图 20 所示。在两根纤芯中写入等长的光纤光栅后,从 A₁ 端输入不同波长的信号光,光在非光栅区域相互耦合后进入光栅段,利用布拉格光栅将特定波长的光信号反射从 B₁ 端输出,而其余信号则继续向前传输,从而达到下载信号的作用。同理反方向输入可实现了信号的上传功能。

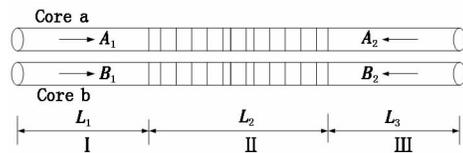


图 20 基于双芯光纤的分插复用器结构示意图

3.6 全光开关

光开关是对集成光路或者传输线路中的光信号进行相互逻辑操作或转换的光学器件。研究者们提出了基于双芯光纤的全光开关,其原理是利用双芯光纤的耦合特性。如图 21 所示,通过设计一定的长度 L,可以使从 1 端输入的功率强的信号光从 1 端输出,而功率较小的信号光从 2 端输出,从而构造光开关,可用于光通信网络^[18]。

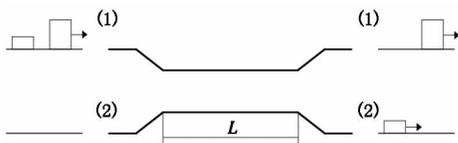


图 21 全光开关工作原理图

3.7 光学镊子

利用特殊的双芯光纤可以设计新型的单光纤光镊,实现光致旋转技术,可应用于表面科学及凝聚态物理、生命科学、微操控及微细加工等领域。其关键部分双芯光纤的探针结构^[19]如图 22 所示。

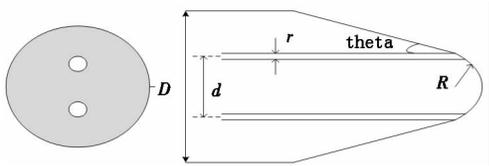


图 22 双芯光纤探针结构

利用新型的耦合技术将单模光纤和双芯光纤先焊接,然后熔融拉锥,并将连接过渡部的制作成椎体波导的方法。当导波光从单芯光纤传输到双芯光纤时,通过缓慢变化的椎体波导,在双芯光纤的纤芯内被重新约束,从而分配功率。

3.8 基于双芯光纤的传感器

利用基于双芯光纤的滤波器在温度、弯曲、扭转和拉伸作用下滤波器峰值波长的变化特性,学者们分别研究了基于双芯光纤的温度传感器^[20]、位移传感器^[20]、弯曲传感器^[21]、扭转传感器^[21]、应力传感^[22]、折射率传感^[23]等。紧凑型全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪^[22],紧凑型全光纤 Michelson 干涉仪^[23]在光纤传感中的研究及应用越来越广泛。如图 23 和图 24 所示,

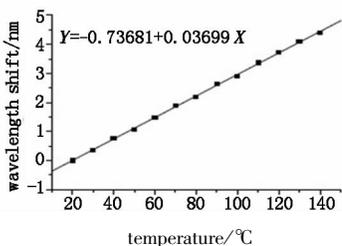


图 23 紧凑型全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪滤波器的波长与温度关系图^[22]

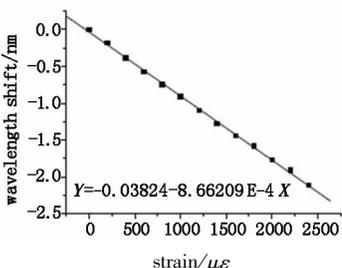


图 24 紧凑型全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪滤波器的波长与应力关系图^[22]

紧凑型全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪滤波器的波长分别随温度和应力的变化而漂移。

4 小结

本文介绍了双芯光纤的发展和最新分类,并重点介绍了基于双芯光纤的耦合型滤波器和 Mach-Zehnder 干涉仪滤波器及其他应用。由于双芯光纤其结构特点和耦特性,基于双芯光纤制作的器件可以应用于多领域,是目前研究的热点之一。

参考文献:

- [1] Zhu Xiaoliang. Coupling mechanism of waveguide micro-structured fiber and standard fiber [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
朱晓亮. 波导型微结构光纤与标准光纤的耦合机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [2] Zou Yi, Dong Xiaopeng. Twin-core fiber and its application [J]. Electronic Technology, 2008, (7): 56 - 58. (in Chinese)
邹毅, 董小鹏. 双芯光纤及其应用 [J]. 电子技术, 2008, (7): 56 - 58.
- [3] P Peterka, I Kasik, J Kanka, et al. Twin-core fiber design and preparation for easy splicing [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2000, 12(12): 1656 - 1658.
- [4] Fan Linyong. Study on all-fiber comb filter and mach-zehnder interferometer [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
范林勇. 全光纤梳状滤波器和马赫—曾德尔干涉仪的研制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [5] Zhang Zhihua. Coupling and sensing mechanisms in dual-core photonic crystal fibers [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
张智华. 光子晶体光纤双芯耦合及传感机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [6] Zhu Ridan, Luo Aiping, Wang Xude, et al. Broadband directional coupler based on dual core PCF [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, (9): 1810 - 1814. (in Chinese)
朱日丹, 罗爱平, 汪徐德, 等. 双芯光子晶体光纤宽带定向耦合器研究 [J]. 光子学报, 2008, (9): 1810 - 1814.
- [7] Weiguo Chen, Shuqin Lou, Liwen Wang, et al. Novel modal interferometer based on ring-core photonic crystal fiber [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(10): 986 - 988.
- [8] Liu Chong, Yuan Libo. Ribbon twin-core optical fiber and its birefringence characteristics [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2011, (4): 90 - 93. (in Chinese)
刘冲, 苑立波. 带状双芯光纤及其双折射特性分析

- [J]. 黑龙江大学学报, 2011, (4): 90 - 93.
- [9] P Rugeland. Monolithic interferometers using gemini fiber [J]. In *Photonics Technology Letters*, 2011: 1001 - 1003.
- [10] Qian Jingren. Coupled-mode theory and its application to fiber optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, (5): 1188 - 1192. (in Chinese)
钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. *光学学报*, 2009, (5): 1188 - 1192.
- [11] Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Fan Linyong, et al. Comb-filter based on twin-core fiber coupler [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, (5): 108 - 112. (in Chinese)
江微微, 赵瑞峰, 范林勇, 等. 基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器[J]. *中国激光*, 2011, (5): 108 - 112.
- [12] Zheng Jingjing, Zheng Kai, Peng Jian, et al. Analysis of splicing and splicing fusion coupling efficiency between single-core fiber and dual-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, (9): 2529 - 2535. (in Chinese)
郑晶晶, 郑凯, 彭健, 等. 单芯光纤与双芯光纤的对接和熔接耦合效率分析[J]. *光学学报*, 2010, (9): 2529 - 2535.
- [13] Zhang Yu, Liu Zhihai, Yang Jun, et al. Theory and experiment for coupling characteristic of core-circular-symmetrical-distribution multi-core fiber [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, (12): 1286 - 1291. (in Chinese)
张羽, 刘志海, 杨军, 等. 纤芯圆对称分布多芯光纤的耦合特性[J]. *发光学报*, 2011, (12): 1286 - 1291.
- [14] Ruifeng Zhao, Li Pei, Tigang Ning, et al. All-fiber low-loss connector for accessing both close cores of twin-core fiber [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(5): 4812 - 4818.
- [15] Chen Haijuan, Yang Xianglin. Equalizing characteristics of twin core fiber amplife [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, (2): 73 - 77. (in Chinese)
陈海娟, 杨祥林. 双芯光纤放大器的研究[J]. *光学学报*, 1999, (2): 73 - 77.
- [16] Lu Yi Bin, P L Chu. Gain flattening by using dual-core fiber in erbium-doped fiber amplifier [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2000, 12(12): 1616 - 1617.
- [17] Sun Kai, An Honglin, Xu Wanjin, et al. Theoretical analysis and device design for the twin-core fiber add/drop multiplexer [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, (11): 1099 - 1103. (in Chinese)
孙锴, 安宏林, 徐万劲, 等. 双芯光纤光分插复用器的理论分析和设计[J]. *光电子 · 激光*, 2001, (11): 1099 - 1103.
- [18] S R Friberg, A M Weiner, Y Silberberg, et al. Femtosecond switching in a dual-core-fiber nonlinear coupler [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(10): 904 - 906.
- [19] Wu Zhongfu. Trapping characteristic research of novel single fiber optical tweezers [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
吴忠福. 新型单光纤光镊捕获特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [20] Zhou Yi. Tunable twin-core fiber and its application in fiber grating sensors and filter [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. (in Chinese)
邹毅. 可调谐双芯光纤及其在光纤光栅传感与滤波器中应用的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [21] Wang Xue. Research on two-core fiber optic sensors [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)
王雪. 双芯光纤传感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [22] Feng Suchun, Honglei Li, Xu Ou, et al. Compact in-fiber mach-zehnder interferometer using a twin-core fiber [C]. *Proc. SPIE*, 2009, 7630: 1 - 5.
- [23] Zhou Ai, Li Guangping, Zhang Yanhui, et al. Asymmetrical twin-core fiber based michelson interferometer for refractive index sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(19): 2985 - 2991.
- [24] Wang Xude, Zhou Zheng, Luo Aiping, et al. Design of twin core photonic crystal fiber coupler using WDM [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(8): 875 - 879. (in Chinese)
汪徐德, 周正, 罗爱平, 等. 波分复用双芯光子晶体光纤耦合器的设计[J]. *激光与红外*, 2011, 41(8): 875 - 879.