

双芯光子晶体光纤温度传感器

汤 劼,陈鹤鸣

(南京邮电大学 光通信研究所,江苏 南京 210003)

摘要:文章设计了一种双芯光子晶体光纤温度传感器,利用纤芯间高折射率柱的谐振效应实现对温度的精确传感。在纤芯间空气孔中注入液晶材料,利用液晶材料折射率的温度变化特性,使温度变化对双芯间的耦合特性产生影响,从而实现对温度的精确传感。仿真结果表明,通过测量双芯透射光功率就可以实现对温度的测量,其灵敏度可以达到 2.5 mW/K 。

关键词:液晶;谐振效应;双芯光子晶体光纤;温度传感

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2011)02-0042-04

Dual-core photonic crystal fiber temperature sensor

Tang Jie, Chen Heming

(Optical communication research institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: A dual-core photonic crystal fiber temperature sensor is presented, achieving accurate temperature sensing by the resonance effects in the high refractive pillar between the two fiber cores. The air hole between the cores was injected with liquid crystal material. The temperature change of liquid crystal refractive index is used influence on the coupling characteristics between two cores, thus realizing accurate temperature sensing. Simulation results show that temperature sensing can be achieved by the measurement of light power transmitted through the dual-cores. Its sensitivity can be up to 2.5 mW/K .

Key words: liquid crystal; coupling effects; dual-core photonic crystal fiber; temperature sensor

0 引 言

光子晶体光纤(PCF)具有无截止单模特性、可控的非线性效应、可控的色散特性和低损耗特性等^[1],结构灵活多样,广泛应用于传感领域。在温度传感方面,一般是通过在 PCF 中填充温敏液体来提高其对温度的灵敏度。传统的 PCF 温度传感器如光子晶体光栅、带隙型 PCF 等,大都依靠检测透射光谱来感知温度的变化,制造工艺复杂,设备成本较高^[2]。

本文设计了一种混合导光机制的双芯 PCF 温度传感器,在两芯间的空气孔中注入液晶材料。利用光束传播法(BPM)对双芯透射功率进行了计算,得出了温度与双芯功率的关系,分析了其传感特性。结果表明:基于混合导光机制的双芯 PCF 温度传感器可以实现较高的灵敏度,输出光功率随温度的变化可以达到 2.5 mW/K ,提高输入的光功率可以使精度更高。

1 双芯 PCF 结构

本文设计的双芯 PCF 温度传感器,液晶填充在双芯间的空气孔中,如图1所示,白色圆柱表示PCF

的空气孔,光纤中央黑色圆柱表示注入液晶的空气孔,光在全内反射和光子带隙效应的作用下在两纤芯中传播,实现混合型导光机制。

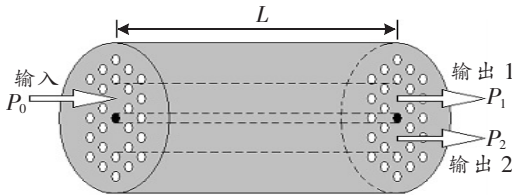


图 1 双芯 PCF (纵向图)

图 2 所示为混合导光机制双芯 PCF 的剖面图。黑色的圆代表空气孔,灰色均匀的圆表示填充液晶的空气孔。可见,折射率高于背景材料的液晶填充

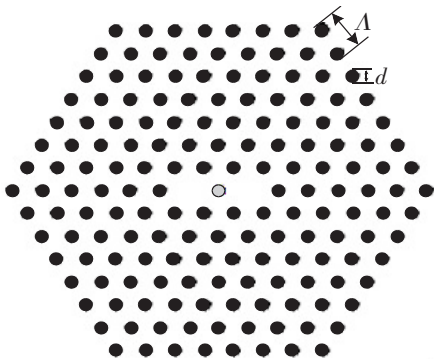


图 2 双芯 PCF 的剖面图

收稿日期:2010-12-30

基金项目:江苏省产学研联合创新基金资助项目(BY2010101)

作者简介:汤劼(1985-),女,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为光通信和光信息处理。

通信作者:陈鹤鸣,教授。E-mail:chhm@njupt.edu.cn

在双芯间的空气孔中。每个纤芯被空气孔和高折射率柱束缚,纤芯中光场的性质由全反射和带隙效应两种导光机制共同决定,高折射率液晶柱引起的光子带隙(PBG)效应会对双芯耦合特性产生重要的影响。图中,空气孔直径为 d ,相邻空气孔距离为 Δ ,填充液晶的折射率为 $n(T)$,背景材料的折射率为 n_0 ,材料色散暂不考虑。

2 传感原理

本文采用的液晶材料的折射率是温度的函数,温度变化会导致中心含液晶材料的介质柱的折射率发生变化,对双芯间的耦合特性产生影响。如图1所示,光从一个纤芯射入,功率为 P_0 ,由于耦合作用在两芯中交替传播,温度的变化会使两芯输出的光功率产生变化,探测输出的光功率 P_1 、 P_2 ,就可以得到温度的变化。

2.1 液晶的温度特性

液晶(LC)是一种高分子材料,它在一定温度或浓度的溶液中,既具有液体的流动性,又具有晶体的各向异性。本文采用向列向液晶 5CB(4-Pentyl-4-cyanobiphenyl,4 戊基 4 氰基体系),当温度低于其向列向转变温度 T_c ($T_c < 100\text{ }^\circ\text{C}$) 时,其折射率是温度的函数 $n(T)$ [3],即

$$n(T) = A - BT - CT^2 \quad (T < 100\text{ }^\circ\text{C}), \quad (1)$$

式中, T 为工作温度,采用绝对温标; A 、 B 和 C 是温度系数。5CB 向列液晶分子长轴方向为光子晶体的轴向,入射光偏振方向与分子长轴方向相同时为 o 光,折射率为 n_o ;入射光偏振方向与分子长轴方向垂直时为 e 光,折射率为 n_e 。 o 光与 e 光折射率温度系数是不同的。

2.2 耦合原理

双芯 PCF 的工作机理是双芯间光波场的横向耦合。当光射入其中一根纤芯时,随着传播距离的增加,全部或部分的光能量会转移到另一根纤芯中,随后又返回到入射纤芯,光能量循环往复地在两个纤芯间发生交换。耦合现象可用波导的横向耦合理论来解释[4],耦合长度 L_c 定义为入射光功率从一根纤芯全部转移到另一根纤芯所需的光纤长度,即

$$L_c = \pi/(\beta_s - \beta_a), \quad (2)$$

式中, β_s 、 β_a 分别代表奇模和耦模的传播常数。对于光纤中的每一种传播模式,有效折射率为 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$,其中 β 表示传播常数, k_0 是自由空间波数,且 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。随着温度的升高,液晶折射率下降,引起模式有效折射率下降,改变模的传播常数可以使

耦合长度发生变化,从而使模式传播的耦合长度发生改变。

3 仿真结果分析

本文所采用的混合导光机制双芯 PCF 的参数如下: $d = 0.6\text{ }\mu\text{m}$, $\Delta = 1.6\text{ }\mu\text{m}$,背景材料折射率 $n_0 = 1.45$,在光纤中央填入液晶材料 5CB[5],采用偏振方向垂直于光纤径向的入射光,所以折射率取 e 光折射率 n_e ;查文献[3]可得, e 光折射率温度系数 $A = 1.986$ 、 $B = 7.993 \times 10^{-4}$ 、 $C = 1.209 \times 10^{-4}$,光纤长度 $L = 2\text{ }048\text{ nm}$,入射光波长为 633 nm ,光源可以采用氦氖激光器,输出光功率是 100 mW 。传感器工作时,光从双芯中的一个芯入射,检测两芯输出光功率时,可以在光纤出射端面放置显微镜,使光纤模场得以放大,再使出射光输入光电探测器就可得到双芯的光功率[6]。

图3所示为依据式(1)中液晶的 e 光折射率温度系数 A 、 B 、 C 计算得到的液晶折射率与温度的关系曲线。由图3可知,在 $0 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ (即 $273 \sim 373\text{ K}$) 范围内,折射率与温度近似呈线性关系,折射率随温度升高而减小, $dn/dT \approx 1 \times 10^{-3}/\text{K}$ 。

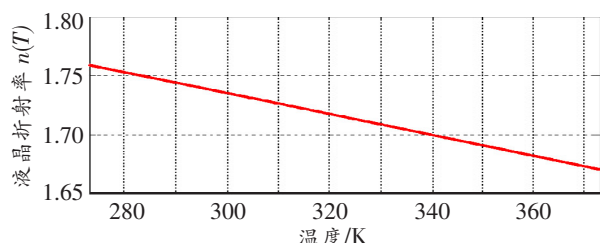


图3 液晶折射率与温度变化的关系

(1) 温度对混合导光机制双芯 PCF 有效折射率的影响

本文用时域有限差分(FDTD)法仿真了温度变化对光纤中基模有效折射率的影响。图4所示为 E_{x0} 模式的有效折射率随温度的变化曲线,可见有效折射率随着温度的升高而降低,亦近似呈线性关系, $dn_{\text{eff}}/dT = 8 \times 10^{-4}/\text{K}$ 。

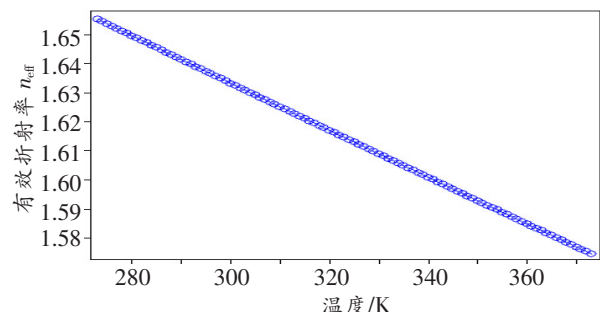


图4 有效折射率与温度变化的关系

(2) 温度对耦合长度的影响

本文用 FDTD 法计算了不同温度下光在双芯 PCF 中传播的耦合长度 L_c ，并用 MATLAB 软件对 L_c 用曲线进行了拟合，所得耦合长度与温度变化的关系如图 5 所示。图 5 表明，随着温度的升高，耦合长度逐渐变小，而且温度越高，耦合长度变化速度越快。当温度从 280 K 升高到 320 K 时，耦合长度只减小了约 100 μm ，而当温度从 320 K 升到 360 K 时，耦合长度减小了约 300 μm 。

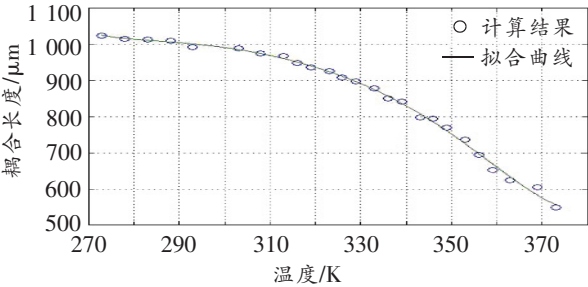


图 5 耦合长度与温度变化的关系

图 5 表明，温度变化引起的折射率变化对混合导光机制双芯 PCF 的传播影响是显而易见的。由于液晶的折射率会随着入射光波长的改变而改变，而能在双芯中传播的光波其波长受到光子晶体带隙的限制，所以仅对 633 nm 波长进行了计算。

(3) 透射光功率与温度变化的关系

用 Rsoft 软件计算的透射光功率与温度变化的关系如图 6 所示。图中曲线①和②分别代表两个纤芯中的光功率变化，曲线③代表的是由液晶构成的介质柱中的光功率，可以看出，光主要是在两芯中交替传播，由液晶构成的介质柱中的光强很弱，对两芯的耦合状态影响不大。温度变化时，由于耦合长度发生了变化，所以双芯的出射光功率 P_1 、 P_2 也随之发生变化，温度从 273 K 升高到 373 K 的过程中，两芯的功率呈振荡变化，温度越高，变化越快。

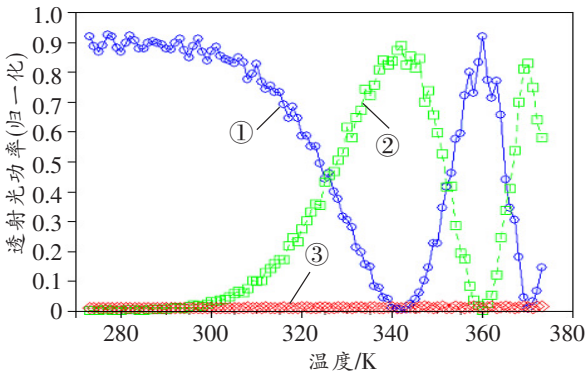


图 6 输出端光功率与温度变化的关系(273~373 K)

由图 6 可见，温度范围在 300~340 K 区间和

340~360 K 区间时，温度与输出光功率可近似为单值对应，可以用于温度传感。当温度超过 360 K 时，光功率随温度变化过快，不适宜温度传感应用。图 6 中在 340 K 前后光功率随温度变化的趋势是不同的。图 7 所示为温度在 300~340 K 区间时两芯的输出功率，功率变化约为 -2.5 mW/K 。图 8 所示为温度在 340~360 K 区间时两芯的输出功率，功率变化约为 5.0 mW/K 。在实际应用中可以用变化趋势的不同标定出温度范围。

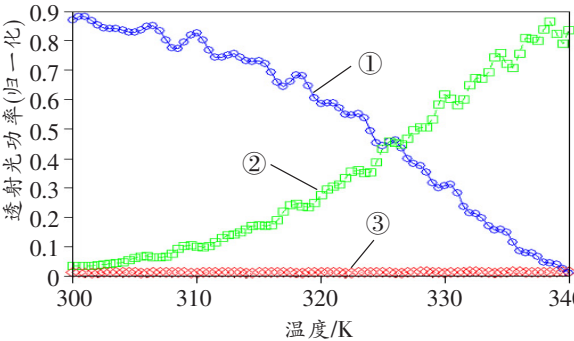


图 7 输出端光功率与温度变化的关系(300~340 K)

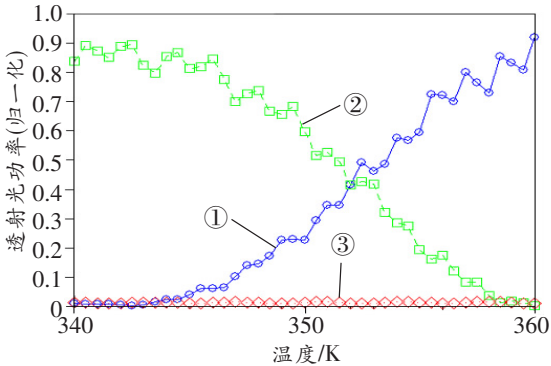


图 8 输出端光功率与温度变化的关系(340~360 K)

由仿真结果可以看出，在温度较高的区域，功率随温度变化更明显，灵敏度更高。而在一定程度上提高输入光功率，可以使传感器灵敏度得到提高。

图 6、图 7 和图 8 都采用了归一化光功率。通过测量每个温度下所对应的双芯 PCF 透射光功率，就可以得到当前的温度值，实现温度传感。本文采用 5CB 液晶使温度传感范围有所扩大，制作流程较易施行，传感精度有所提高。

4 结束语

本文设计了一种基于混合导光机制的双芯 PCF 温度传感器，采用在中间空气孔加注对温度敏感的液晶的方法，简化了制作流程，提高了传感精度。本文用 BPM 对双芯 PCF 温度传感器进行了仿真计算。结果表明，随着温度的升高，双芯的耦合长

度逐渐减小,使得出射的光功率呈现变化;在单调温度变化区,通过测量双芯透射光功率就可以实现对温度的测量;在较高的温度下,传感范围有所减小,但是传感性能更好。与高双折射光子晶体温度传感器相比,本文设计的温度传感器精度有很大提高,对光功率的测量更易于实现。

参考文献：

[1] Jr A Cerqueira S, Luan F, Cordeiro C M B. Hybrid photonic crystal fiber [J]. Opt Express, 2006, 14 (2): 926-931.
[2] 于秀娟,张敏,廖延彪. 光子晶体光纤长周期光栅制作

技术与应用最新进展 [J]. 激光杂志, 2008, 29(5): 4-8.
[3] Pochi Yeh. Optics of Liquid Crystal Displays [J]. Optical Society of America, 2007, 2(1): 1-2.
[4] Feit M D, Fleck J A. Computation of mode properties in optical fiber wave-guides by a propagating beam method [J]. Applied Optics, 1980, 19(7): 1154-1164.
[5] Roey J Van, Donk J van der, Lagasse P E. Beam-propagation method: analysis and assessment [J]. JO-SA, 1981, 71(7): 803-810.
[6] Foroni M, Poli F, Cucinotta A, et al. Scanning Near-Field Microscopy of Photonic Crystal Fibers [J]. IC-TON, 2006, 2(10): 84-87.

* 简 讯 *

WTD 发布 40 Gbit/s RZ-DQPSK Transponder 模块等系列新品

OFC/NFOEC 2011 美国光纤通信展开幕在即,武汉电信器件公司(WTD)于 OFC 展前夕发布了用于 40 Gbit/s DWDM 系统干线传输网线路侧的 40 Gbit/s RZ-DQPSK Transponder 模块等系列新产品,并将在 2011 OFC 展上进行部分新品的展示。

WTD 发布的采用 NRZ-DPSK 和 RZ-DQPSK 编码技术的 40 Gbit/s Transponder 模块可广泛应用于电信长距离传输 DWDM 系统,支持 42.8 ~ 44.6 Gbit/s 速率,满足 OTU3 及其 FEC 条件下的光传输应用。RZ-DQPSK 调制格式在长距离传输上具有更好的色度色散容限、偏振模色散容限和抗非线性的性能。模块实现了 96 波长可调谐,波长范围覆盖整个 C 波段,波长间隔也符合 ITU-T 建议的 50 GHz 间隔。与此同时,为特定客户定制的 NRZ 强度调制 Transponder 模块目前支持 39.8 Gbit/s 和 43.1 Gbit/s 双速率,将广泛应用于高速信号的监控采集、波长转换子系统等特定领域。

WTD 40 Gbit/s RZ-DQPSK Transponder 模块采用了具有自主知识产权的“应用于相位调制器的工作点控制装置”、“DPSK/DQPSK 模块延迟干涉仪控制装置”等专利技术,在产品研发过程中还参与了 40 Gbit/s Transponder 模块的标准制订工作,WTD 参与起草的“40 Gbit/s 相位调制光收发模块合一模块技术条件”已被批准为行业标准,现正申报国家标准。该系列产品可充分改善光系统的光信噪比指标,同时优化系统性能,降低成本。上述系列新产品的发布充分构筑了 WTD 40 Gbit/s Transponder 模块产品系列的完整性,标志着 WTD 在高速光传输领域核心光模块上已能提供完整的解决方案。