

零模间色散双空芯光子晶体光纤

马玲芳^{1,2} 刘敏^{1,2} 李丹¹ 钱燕¹

¹重庆大学通信工程学院, 重庆 400044
²重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

摘要 分析了双空芯光子晶体光纤(HC-PCF)在纤芯填充液态高折射率温敏物质后的传输特性,应用全矢量有限元法(FEM)研究温度均匀变化时光纤耦合特性、模间色散特性的变化规律。结果表明,在特定温度下,耦合特性随传输波长的增大呈现出先减弱、后增强的变化趋势,且光纤的模间色散存在过零点。通过调节温度或占空比,可以在 1.31 μm 和 1.55 μm 两个常用通信波段内实现零模间色散传输,由此能够完全消除模式间相位不匹配导致的脉冲失真,实现能量的完全交换。

关键词 光纤光学;模间色散;全矢量有限元法;耦合系数

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0805006

A Kind of Hollow Dual-Core Photonic Crystal Fiber with Zero Inter-Modal Dispersion

Ma Lingfang^{1,2} Liu Min^{1,2} Li Dan¹ Qian Yan¹

¹ College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China
² Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Education Ministry of China, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract A hollow dual-core photonic crystal fiber (HC-PCF) filled with high refractive index liquid sensitive to temperature is analyzed. The coupling properties and the inter-modal dispersion are investigated by using full-vector finite element method (FEM). Theoretical results show that with the increase of the wavelength, the coupling coefficient will decrease first and then increase for a certain temperature. Especially, the zero inter-modal dispersion can be achieved at a particular wavelength. By adjusting the temperature and/or the structure parameter d/Λ , zero inter-modal dispersion in an extremely wide wavelength range including both 1.31 μm and 1.55 μm is realized. This implies that the pulse distortion effect due to the mismatch between different modes can be eradicated and 100% power transfer can be realized in such a hollow dual-core photonic crystal fiber.

Key words fiber optics; inter-modal dispersion; full-vector finite element method; coupling coefficient

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.2330; 060.5295

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)是通过在无限的二维光子晶体内引入缺陷而形成的,自从其问世以来,早已成为光学与光电子学领域研究的焦点^[1,2]。双芯光子晶体光纤既可以作为传输信息的媒介,又可以用于常见光学器件的制作。如光纤定向耦合器^[3]、窄带

滤波器^[4]、波分复用/解复用器^[5,6]等。在双芯光子晶体光纤中,存在 x 和 y 两个正交的偏振方向。对于每种偏振方向而言,同时存在两种不同的奇偶模式。在传输过程中,这两种模式所引起的群时延差即被称作模间色散(IMD)。理论和实验证实^[7~12],模间色散是影响短光脉冲传输的一个重要因素,尤

收稿日期: 2012-02-20; **收到修改稿日期**: 2012-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61007049)资助课题。

作者简介: 马玲芳(1987—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤方面的研究。E-mail: malingfang666@163.com

导师简介: 刘敏(1975—),女,博士,副教授,主要从事下一代光通信、光纤光栅、光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: liumin@cqu.edu.cn

其当光纤的模间色散引起的群时延与传输脉冲的宽度相当或大于脉冲宽度时,会引起严重的脉冲失真,甚至完全分裂。如果模间色散为零,则脉冲不会变形,因而可以实现脉冲能量在两个纤芯间 100% 的完全交换,这对于实现全光开关非常具有吸引力。目前所有关于模间色散的报道中,仅本课题通过改变双芯光纤中两个纤芯的非对称性,在 1.55 μm 通信窗口处实现了零模间色散,然而这在光纤拉制过程中并不易控制^[13]。本文仅通过填充双空芯光子晶体光纤,就可以同时实现两个通信窗口 1.3/1.55 μm 处的零模间色散传输,是零模间色散研究工作的进一步拓展。

空芯光子晶体光纤(HC-PCF)是一种基于光子带隙效应的新型光纤,理论上具有低损耗、色散可控、非线性可控、可传输超强激光以及可成为液体或气体通道等优点。目前,已有在 PCF 空气孔中填充高折射率材料的实验报道,如填充液晶的电控光开关^[14,15]、填充热敏材料的可调节滤波器^[16]等。王志^[17]已经证明,在双空芯带隙光子晶体光纤中存在无耦合现象。本文在双空芯带隙光纤的纤芯内填充高折射率温敏物质——液态乙醇,通过调节温度及结构占空比 d/Λ 的值,使其无耦合现象消失,并在不同传输波长处实现零模间色散,为双空芯光子晶体光纤的应用提供了新的途径。

2 光纤建模

双空芯光纤截面几何结构如图 1 所示。光纤包层为具有三角晶格结构的二维光子晶体,图中白色圆圈为包层空气孔,其直径为 d 。在光纤中心处引

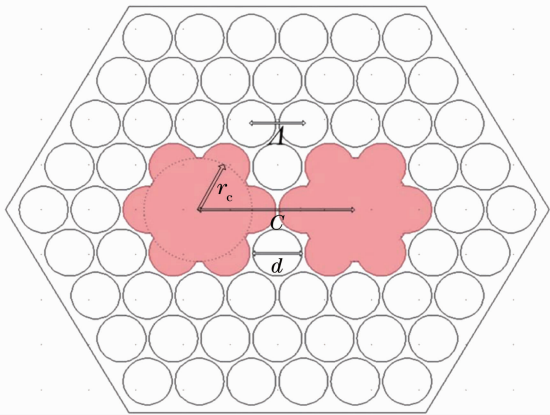


图 1 双芯光子晶体光纤截面几何结构图
Fig.1 Cross section of the dual-core photonic crystal fiber

入两个相邻的大空气孔与包层相截切,形成花瓣形纤芯,即图中已用红色标示的部分(彩图请见网络电子版)。纤芯半径为 r_c (虚线圆环是为了更清楚地表示 r_c 的几何意义而做的辅助线,实际并不存在),包层相邻气孔之间的距离为 Λ ,两纤芯间距 $C=3\Lambda$ 。

包层气孔的折射率设为常数 1.0,背景材料为二氧化硅,由于光纤占空比 $d/\Lambda \geq 0.92$,硅材料占据的比重十分小,所以忽略二氧化硅自身的材料色散,将其折射率设为常数 1.444。纤芯内所填充液态乙醇的折射率随温度线性变化,二者关系为^[18]

$$n = n_0 - a(T - T_0), \quad (1)$$

式中 n 为不同温度下液态乙醇的折射率, n_0 为参考温度 T_0 时液态乙醇的折射率, $a = 3.94 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 为温敏系数, T 为变量,表示环境温度。取参考温度 $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $n_0 = 1.36048$ 。由于二氧化硅的温敏系数为 $8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,比所填充的液态乙醇的温敏系数低 2 个数量级,因此在分析中,近似认为二氧化硅的折射率不随温度变化。众所周知,物质在环境温度增大时会产生热膨胀效应,但已有相关文献可以证实^[19],这种热膨胀效应对光纤模场的影响微乎其微,因此这种热力学效应可以忽略。

本文采用全矢量有限元法(FEM)进行分析,利用 Comsol Mutiphysics 软件进行仿真。光在光子晶体光纤中传播时,仍然遵循 Maxwell 方程。建立光纤传输的理论模型之后,设定光纤的理想边界条件,并将连续的频谱离散化,从 Maxwell 方程出发可以推导出光子晶体光纤所遵循的电场波向量方程。通过对方程的求解可以得到传播常数 k_z ,进而可得到光纤的模式有效折射率为

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{Re}(k_z)}{2\pi/\lambda}. \quad (2)$$

填充液态乙醇之后,由于纤芯折射率大于包层的平均折射率,双空芯光纤的传导机制为折射率引导型,光纤内可传导的光谱范围大大展宽。在参考温度 $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,光纤的有效折射率随传输波长的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,光纤的有效折射率随着传输波长的增大而减小,这是因为长波光场渗透到包层空气孔中的能力更强,从而使光纤的有效折射率变小。光纤两个偏振方向的奇模有效折射率基本相同,曲线近乎重合。但 x 偏振方向偶模的有效折射率要大于 y 偏振方向,表明光纤 x 和 y 偏振方向上的传输特性存在差异,在理论分析中不可忽略。

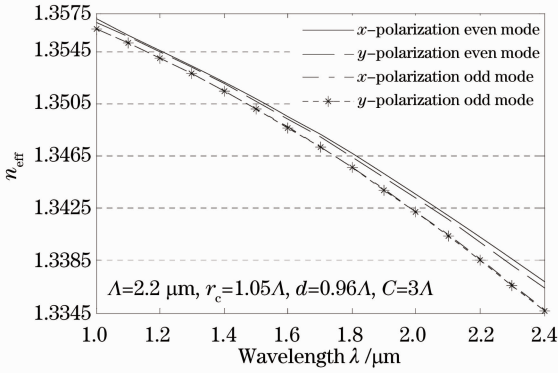

 图2 x 和 y 偏振方向有效折射率曲线

 Fig. 2 Effective index of the even and odd modes for the x and y polarization

3 数值模拟与仿真

3.1 耦合特性分析

在双芯光纤耦合器中,若忽略传输过程中的功率损耗、4 阶以上高阶色散及偏振方向的影响,脉冲在两纤芯之间的传导可以用一对耦合模式方程^[8]来描述。双芯光纤的耦合可以用两个纤芯相互作用形成的奇模和偶模之间的叠加来描述,奇偶超模具有不同的传播常数,二者相互叠加的结果使得能量在两个纤芯之间进行周期性地交换传输。衡量双芯之间耦合特性强弱及变化规律的物理量是耦合系数 $k(\omega)$,该耦合系数 $k(\omega)$ 依赖于传输频率(或传输波长)而变化,将二者间的函数关系式在角频率 ω_0 处进行泰勒级数展开,可以得到^[12]

$$k(\omega) \approx k(\omega_0) + (\omega - \omega_0)k_1 + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2 k_2 + \dots, \quad (3)$$

式中 $k(\omega_0)$ 为在频率 ω_0 处光纤的耦合系数 $k_1 = \partial k(\omega) / \partial \omega$ 为光纤的一阶耦合色散系数或模间色散, $k_2 = \partial^2 k(\omega) / \partial \omega^2$ 为光纤的二阶耦合色散系数。 k 越大,表示耦合特性越强, k 的求解表示为

$$k = \frac{k_{ze} - k_{zo}}{2} = (2\pi/\lambda) \frac{n_{\text{eff}}^e - n_{\text{eff}}^o}{2} = \frac{\pi}{2L_c}, \quad (4)$$

式中 k_{ze} 和 k_{zo} 分别表示沿光纤传输方向偶模和奇模的传播常数, n_{eff}^e 和 n_{eff}^o 分别表示光纤偶模和奇模的有效折射率。参考温度为 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 时,作出耦合系数 k 随传输波长的变化曲线,如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,在整个传输波长范围内, x 偏振方向的耦合系数大于 y 偏振方向。这是因为,纤芯位于 x 方向上,导致 x 偏振方向的耦合强度要大于 y 偏振方向,耦合系数亦大于 y 偏振方向。对于一般的全内反射(TIR)型 PCF 来讲,由于纤芯对长波

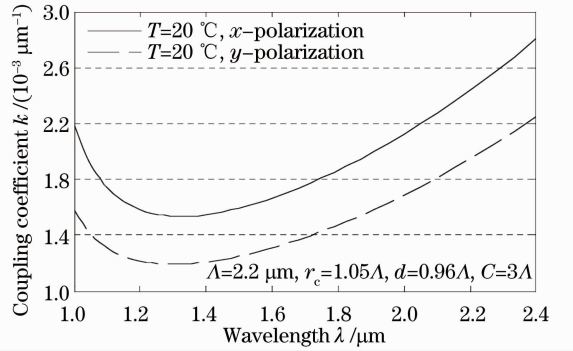


图3 耦合系数随传输波长的变化曲线

 Fig. 3 Coupling coefficient as a function of wavelength for the x and y polarization

长的光束束缚能力较弱,使其更容易渗入包层扩大模场面积,耦合系数随着传输波长的增大应单调增大。但是图 3 显示,该双空芯结构的光纤并不遵循这一规律。可以看到随着传输波长的增大,不论 x 偏振方向还是 y 偏振方向,耦合系数均先减小,到达一个最低点后又逐渐增大,即耦合特性先减弱后逐渐增强。其中在 x 偏振方向,耦合系数达到最低值时传输波长为 $1.32 \mu\text{m}$; y 偏振方向,耦合系数达到最低值时传输波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 。究其根源,是因为纤芯填充了液体乙醇后,影响了光纤的传输特性。

虽然纤芯所填充的液体乙醇的折射率小于背景材料二氧化硅的折射率,但是它大于包层的有效折射率。随着光纤内传输波长变短,包层有效折射率会逐渐接近二氧化硅的折射率^[20],导致纤芯填充的乙醇的折射率小于包层的有效折射率,这时模式将被截止,对应的波长称为截止波长。只有当传输波长大于截止波长时,才可以通过 TIR 机制在光纤内传输。此时填充了液态乙醇的双空芯光纤可以用作高通滤波器。随着传输波长由长波向短波方向移动,光纤中的模场首先逐渐缩小,到达某阈值波长处开始反常扩散,直到截止波长处模式截止。因此模场从阈值波长处开始反常扩散的过程中,其变化将不遵循波长的变化规律^[21,22]。与之相应,在模场变化的整个过程中耦合系数会先减小,在阈值波长处达到最小值,之后随着模场的反常扩散开始逐渐增大,其规律如图 3 曲线所示。

3.2 模间色散特性分析

耦合系数 $k(\omega)$ 是传输频率或波长的函数,耦合系数的波长依赖特性为耦合系数色散,由(3)式可看出存在多阶耦合系数色散 k_1, k_2, \dots 。在分析脉冲转换和全光开关的实现过程中,模间色散会导致脉冲展宽、失真甚至完全分裂,使陡峭的开关特性急剧

恶化。由于高阶色散的值相对较小(二阶色散约为 $10^{-27} \text{ s}^2/\text{m}$),因此忽略二阶等高阶色散,仅对模间色散 k_1 进行研究。在参考温度 $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,作出模间色散 k_1 随传输波长的变化曲线,如图 4 所示。

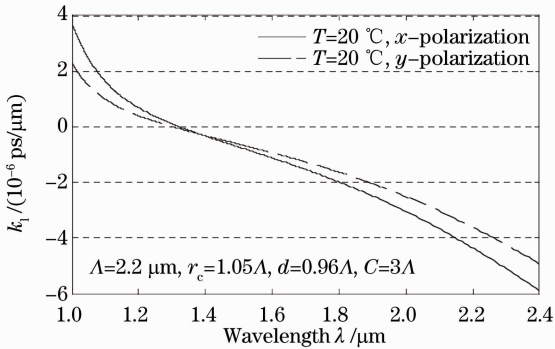


图 4 模间色散随传输波长的变化曲线

Fig. 4 Inter-modal dispersion as a function of wavelength for the x and y polarization

从图 4 可以看到,在整个传输波长范围内, k_1 的值呈递减趋势,且在特定波长处存在过零点。经计算得出,在光纤 x 偏振方向,波长为 $1.32 \text{ } \mu\text{m}$ 时 $k_1 = 0$; y 偏振方向,波长为 $1.30 \text{ } \mu\text{m}$ 时 $k_1 = 0$ 。 $k_1 = 0$ 时光脉冲可以很好地在纤芯间耦合传输,不会产生由于模式间相位不匹配导致的脉冲展宽,表现出良好的开关特性。将 $k_1 = 0$ 时所对应的传输波长定义为零模间色散波长,因此,光纤 x 偏振方向的零模间色散波长为 $1.32 \text{ } \mu\text{m}$,光纤 y 偏振方向的零模间色散波长为 $1.30 \text{ } \mu\text{m}$ 。在零模间色散波长处,光纤的耦合系数将不随传输波长的变化而变化。

由于液态乙醇的折射率对温度变化十分敏感,随着温度的升高,由(1)式可以得出,纤芯中填充的液态乙醇的折射率会有所下降,从而导致光纤中模式传输特性的改变。图 5 给出温度改变时 k_1 随传输波长变化的关系曲线。

由图 5 可以看出,随着传输波长的增大,不同温度下光纤 x 和 y 偏振方向模间色散均逐渐减小,且存在过零点。温度越大,模间色散随传输波长的变化愈明显,且零模间色散波长愈大。以 y 偏振方向为例, $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,零模间色散波长为 $1.24 \text{ } \mu\text{m}$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,零模间色散波长为 $1.30 \text{ } \mu\text{m}$; $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,零模间色散波长为 $1.36 \text{ } \mu\text{m}$; $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,零模间色散波长为 $1.42 \text{ } \mu\text{m}$ 。为更加详细地分析温度变化对零模间色散波长的影响,作出零模间色散波长随温度的变化曲线,如图 6 所示。可以看出,随着温度的均匀增大,零模间色散波长逐渐向长波方向移动。温度从 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $80 \text{ }^\circ\text{C}$, x 偏振方向零模间色

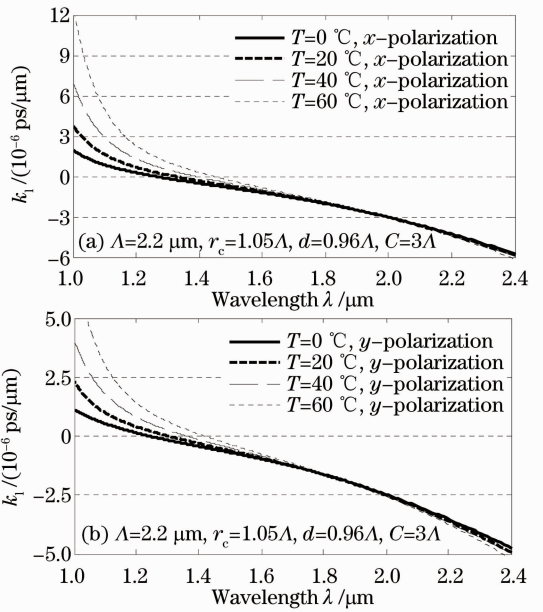


图 5 温度变化时模间色散随传输波长的变化曲线。

(a) x 偏振方向;(b) y 偏振方向

Fig. 5 Inter-modal dispersion as a function of wavelength with the variation of temperature. (a) For the x polarization; (b) for the y polarization

散波长从 $1.19 \text{ } \mu\text{m}$ 增大至 $1.50 \text{ } \mu\text{m}$, y 偏振方向零模间色散波长从 $1.17 \text{ } \mu\text{m}$ 增大至 $1.47 \text{ } \mu\text{m}$ 。且在任一固定温度下, x 偏振方向的零模间色散波长均大于 y 偏振方向。

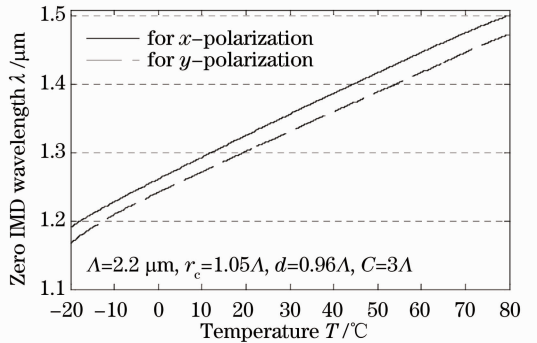


图 6 零模间色散波长随温度的变化曲线

Fig. 6 Zero IMD wavelength as a function of temperature for the x and y polarization

由于模间色散与光纤结构参数密切相关,因此有必要研究光纤结构参数对零模间色散波长的影响。图 7 给出保持孔间距 $\Lambda = 2.2 \text{ } \mu\text{m}$ 不变,令 d/Λ 分别为 $0.92, 0.94, 0.96$, 占空比变化时零模间色散波长随温度的变化曲线。

由图 7 可以看出,零模间色散波长受占空比及温度的影响较大。随着温度的升高,零模间色散波长逐渐增大,二者基本呈线性关系;而在固定的温度

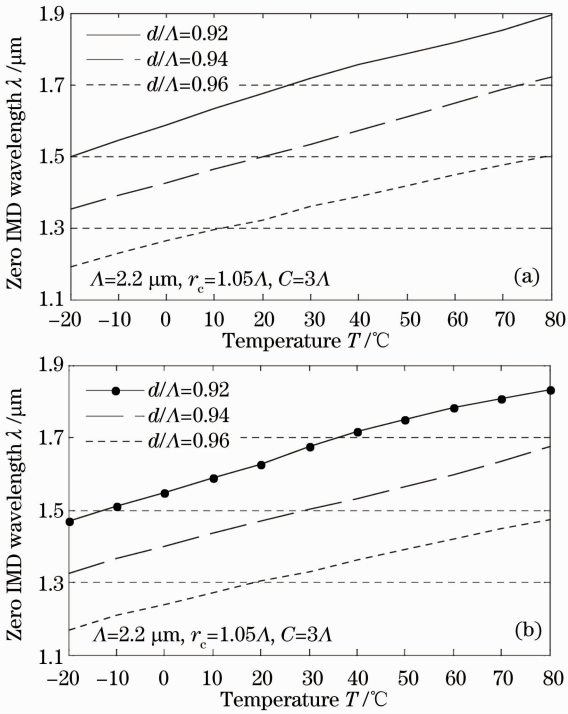


图 7 d/Λ 不同时零模间色散波长随温度的变化曲线。

(a) x 偏振方向; (b) y 偏振方向

Fig. 7 Zero IMD wavelength as a function of temperature with the variation of d/Λ . (a) For the x polarization; (b) for the y polarization

下, 占空比 d/Λ 越大, 零模间色散波长越短。以光纤 y 偏振方向 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 为例, $d/\Lambda=0.92$ 时, 零模间色散波长为 $1.47\text{ }\mu\text{m}$; $d/\Lambda=0.94$ 时, 零模间色散波长为 $1.33\text{ }\mu\text{m}$; $d/\Lambda=0.96$ 时, 零模间色散波长为 $1.17\text{ }\mu\text{m}$ 。为更清楚地比较不同占空比结构下的零模间色散波长特性, 如表 1 所示。

由表 1 可以明显观察到占空比不同时零模间色散传输的波长范围、宽度及所涵盖的常用通信波段。因此, 可以通过控制环境温度及调节占空比 d/Λ 值, 在 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 两个常见通信窗口内实现零模间色散。同时, 可以计算出实现零模间色散所对应的环境温度, 通过(1)式, 可以换算出此时纤芯填充液态乙醇的折射率, 如表 2 所示。

由表 2 可以得到在常见通信波段实现零模间色散传输时所填充的液态乙醇的折射率。由于液态乙醇是温敏物质, 其折射率随温度的变化十分灵敏, 从而使光纤的传输特性亦对温度十分敏感。这种光纤可以用于具有温度传感功能的光学器件及光纤传导的设计中。如果在实际应用中不需要温度传感功能, 则可以用具有相同折射率而对温度不敏感的折

表 1 零模间色散波长比较

Table 1 Comparison of the zero IMD wavelength

Polarization	d/Λ	Adjustable	Width / nm	Common wavelength covered / μm
		range of the zero IMD wavelength / μm		
x	0.92	1.50~1.90	400	1.55
	0.94	1.35~1.72	370	1.55
	0.96	1.19~1.50	310	1.31
y	0.92	1.47~1.83	360	1.55
	0.94	1.33~1.67	340	1.55
	0.96	1.17~1.47	300	1.31

表 2 纤芯填充物质折射率的比较

Table 2 Comparison of the refractive index of the material filled in the core

Polarization	d/Λ	Common	Corresponding temperature / $^\circ\text{C}$	Refractive index of the material filled in the core
		wavelength covered / μm		
x	0.92	1.55	-8.38	1.371662
	0.94	1.55	34.38	1.354814
	0.96	1.31	15.44	1.362277
y	0.92	1.55	0.29	1.368246
	0.94	1.55	45.68	1.350362
	0.96	1.31	22.65	1.359436

射率匹配液或其他液体材料来代替液态乙醇, 在实现零模间色散的同时可以消除对环境温度的依赖性。

本文的数值分析结果证实, 可以在两个常用通信波段($1.31/1.55\text{ }\mu\text{m}$)同时获得零模间色散。通过改变环境温度和结构占空比, 可以在一定范围内对零模间色散波长进行调节。

4 结 论

通过利用空芯光子晶体光纤可作为液体通道的优点, 在双空芯带隙光纤的纤芯内填充液态乙醇, 运用全矢量有限元法进行仿真分析。理论研究结果表明, 环境温度不变时, 光纤的耦合特性随传输波长的增大呈现出先减弱、后增强的变化规律, 且可以在特定传输波长处实现零模间色散。随着环境温度的升高, 零模间色散波长向长波方向移动。此外, 光纤占空比 d/Λ 越大, 零模间色散波长越短。通过调节环境温度及占空比的值, 可以在常用通信波段 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 处获得零模间色散, 这对于光纤耦合器尤其是全光开关的设计和应用具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 T. R. Wolinski, K. Szaniawskn, S. Ertman *et al.*. Influence of temperature and electrical fields on propagation properties of photonic liquid-crystal fibers[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2006, **17**(5): 985~991
- 2 Zhang Zhihua, Shi Yifei, Bian Baomin *et al.*. Study on coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 228~232
张智华, 石一飞, 卞保民等. 混合导光机制光子晶体光纤双芯耦合研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 228~232
- 3 X. Yu, M. Liu, Y. Chung *et al.*. Coupling coefficient of two-core microstructured optical fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **260**(1): 164~169
- 4 P. Pavel, J. Kanka. Erbium-doped twin-core fibre narrow-band filter for fibrelasers [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 2001, **33**(4-5): 571~581
- 5 Lin Ganbin, Zou Yi, Dong Xiaopeng. Gain flattening filter with twin-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 0505001
林淦斌, 邹毅, 董小鹏. 采用双芯光纤的增益平坦滤波器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 0505001
- 6 Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Fan Linyong *et al.*. Comb-filter based on twin-core fiber coupler[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505001
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, **38**(5): 0505001
- 7 M. Liu, K. S. Chiang. Pulse propagation in a decoupled two-core fiber[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 21261~21268
- 8 M. Liu, K. S. Chiang. Propagation of ultra short pulses in a nonlinear two-core photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(4): 815~820
- 9 M. Liu, P. Shum. Effects of intermodal dispersion on short pulse propagation in an active nonlinear two-core fiber coupler [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1080~1082
- 10 K. S. Chiang. Intermodal dispersion in two-core optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 997~999
- 11 K. S. Chiang, Y. T. Chow, D. J. Richardson *et al.*. Experimental demonstration of intermodal dispersion in a two-core optical fibre[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **143**(4-6): 189~192
- 12 K. S. Chiang. Coupled-mode equations for pulse switching in parallel waveguides [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(6): 950~954
- 13 M. Liu, K. S. Chiang, P. Shum. Evaluation of intermodal dispersion in a two-core fiber with non-identical cores[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **219**(1-6): 171~176
- 14 F. Do, Y. Lu, S. Wu. Electrically tunable liquid-crystal photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(12): 2181~2183
- 15 M. W. Haakestad, T. T. Alkeskjold, M. D. Nielsen *et al.*. Electrically tunable photonic bandgap guidance in a liquid filled photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 819~821
- 16 P. Steinvurzel, B. J. Eggleton, C. M. de Sterke *et al.*. Continuously tunable bandpass filtering using high index inclusion microstructured optical fiber[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(8): 463~464
- 17 Wang Zhi. Study on Functional Devices of Photonic Crystal Fibers[R]. Tianjin: Nankai University, 2007. 24~26
王志. 光子晶体光纤功能器件的研究[R]. 天津: 南开大学, 2007. 24~26
- 18 Li Xuejin, Yu Yongqin, Hong Xueming *et al.*. Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1140~1144
李学金, 于永芹, 洪学明等. 基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1140~1144
- 19 Wei Yan, Chang Deyuan, Zheng Kai *et al.*. Numerical simulation of temperature properties of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 945~951
卫延, 常德远, 郑凯等. 光子晶体光纤的温度特性数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 945~951
- 20 J. Laegsgaard, O. Bang, A. Bjarklev. Photonic crystal fiber design for broadband directional coupling[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21): 2473~2475
- 21 B. J. Mangan, J. Arriaga, T. A. Birks *et al.*. Fundamental-mode cutoff in a photonic crystal fiber with a depressed-index core [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(19): 1469~1471
- 22 Zhu Ridan, Luo Aiping, Wang Xude *et al.*. Broadband directional coupler based on dual core PCF[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(9): 1810~1814
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, **37**(9): 1810~1814

栏目编辑: 王晓琰