

文章编号:1002-2082(2010)02-0305-04

基于谐振耦合现象的三芯光子 晶体光纤带通滤波器

余学权, 刘明礼, 汪昊, 陈伟

(江苏大学 机械工程学院光信息科学与技术系, 江苏 镇江 212013)

摘要:设计了一种三芯光子晶体光纤带通滤波器结构。利用纤芯间的谐振耦合, 实现了滤波。当3个纤芯基模模式有效折射率在同一频率点实现匹配时, 将产生谐振现象。通过合理选取光纤结构参数, 可以使3个模式满足谐振条件。由于3个纤芯基模只在工作波长处实现有效折射率的匹配, 因而纤芯间发生波长的选择性耦合。应用全矢量光束传播法(BPM)分析了这种光纤带通滤波器的性能。结果表明: 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 工作波长上, 光纤耦合长度为 $22.8\ \text{mm}$; 在损耗低于 $-3\ \text{dB}$ 前提下, 通带带宽为 $8.9\ \text{nm}$ 。

关键词:三芯光子晶体光纤; 滤波器; 光束传播法; 窄带

中图分类号: TN252

文献标志码: A

Bandpass filter based on resonant tunneling phenomenon in three-core photonic crystal fibers

YU Xue-quan, LIU Ming-li, WANG Hao, CHEN Wei

(Department of Optical Engineering, School of Mechanic Engineering,
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A bandpass filter based on resonant tunneling phenomenon in three-core photonic crystal fibers (PCFs) is presented. Resonance will occur if the effective refractive indices of the fundamental modes of three-core PCFs match at the same wavelength. By choosing the proper parameters of PCFs, all the three modes could meet the resonant condition. The effective refractive indices of the three-cores match only at the wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$. As a result, wavelength-selective coupling is achieved. Full-vector beam propagation method (BPM) is employed to analyze the performance of the filter. Numerical investigation demonstrates that the coupling length is $22.8\ \text{mm}$, and the bandwidth of the bandpass filter is $8.9\ \text{nm}$ with the loss of $-3\ \text{dB}$ at $1.55\ \mu\text{m}$.

Key words: three-core photonic crystal fibers; filter; beam propagation method; narrow-band

引言

光纤滤波器作为集成光学中的一种重要无源器件之一, 广泛应用于波分复用(WDM)光通信系统和传感系统中。该器件的工作机制有基于光纤耦合器的, 也有基于光纤光栅和光纤干涉仪的光纤滤

波器, 例如: Kitayama 等^[1]提出了双芯光纤波长选择性耦合器的应用与设计; Ashish 等^[2]提出的 Bragg 光栅滤波器和长周期光栅滤波器已实现商业化。常规光纤及光纤光栅滤波器种类繁多, 但因其结构变化少, 设计自由度低, 剪裁不够方便, 仍不

收稿日期: 2009-11-29; 修回日期: 2010-01-09

作者简介: 余学权(1983-), 男, 江苏涟水人, 硕士研究生, 主要从事光无源通信器件的研究工作。

E-mail: yuxuequan99@yahoo.com.cn

能满足实际需要。光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)^[3]又称多孔光纤,是一种具有沿光纤轴向上周期性排列的空气孔构成的微结构包层的光纤。基于其特殊的结构,人们已经设计出具有各种用途的光学器件,如:PCF 模式转换器^[4]、PCF 波分复用器^[5]、PCF 偏振分束器^[6]、PCF 传感器以及定向耦合器^[7]。近几年来,随着光子晶体光纤的进一步发展,出现了基于光子晶体光纤的滤波器;光子晶体光纤滤波器具有设计自由度高、剪裁方便、结构变化多的优点。目前,光子晶体光纤滤波器的设计主要是基于双芯光纤的波长选择性耦合。例如,Sun^[8]提出了一种基于非对称双芯光子晶体光纤滤波器结构,通过对右纤芯内包层空气孔进行高掺杂,实现了基于全内反射和光子带隙两种导光机制的滤波器结构,其工作带宽为 17 nm。Chen 等^[9]提出了一种基于全内反射的双芯光纤带阻滤波器结构,其阻带宽为 26 nm。然而,双芯光子晶体光纤滤波器的两纤芯模式折射率很难只在一个频率点上实现匹配,因此基于双芯结构的滤波器带宽往往比较大,而且会引入较大的旁瓣(sidelobes),影响光纤通信的数据传输质量。

本文提出了一种基于谐振耦合现象的三芯光子晶体光纤滤波器结构,应用全矢量光束传播法(BPM)对其工作特性进行计算仿真,结果表明,该带通滤波器在工作波长为 1.55 μm 处时,光纤耦合长度为 22.8 mm;在损耗低于 -3 dB 前提下,带宽为 8.9 nm。通过与双芯结构光纤滤波器比较,发现旁瓣能够很好地被压制。

1 带通滤波器结构及原理

图 1 为带通滤波器的横截面,图中灰色区域表示纯石英,其折射率为 1.45,白色区域表示包层空气孔,深色区域表示掺杂的石英材料;纤芯 A,B,C 可视为 3 个独立的并行波导,其中 A,C 波导具有完全相同的结构,A,C 波导都是由缺失一个空气孔构成,B 波导是由缺失 7 个周期孔构成。A,C 波导与纯石英的折射率差 $\Delta_1 = 0.002$,B 波导与纯石英的折射率差 $\Delta_2 = -0.005$ 。空气孔周期 $\Lambda = 3.93 \mu\text{m}$,外包层孔直径 d 的取值为 0.5Λ ,3 个纤芯的内包层空气孔直径 $d_i = 0.9d$,B 波导直径为 d_c ,A 波导直径 $d_i = 0.436d_c$ 。A 波导和 C 波导为输入/输出波导,B 波导为谐振通道。

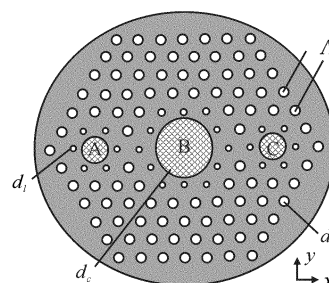


图 1 三芯光子晶体光纤带通滤波器横截面结构
Fig. 1 Cross section of the proposed bandpass filter in three core PCFs

由波导模式耦合理论可知,当波导模式有效折射率匹配时,波导间将发生耦合,耦合长度定义为入射光功率从一个纤芯全部转移到另一个纤芯所需光纤的长度。PCF 中总的模式场可以看作奇模和偶模的迭加,从模式理论角度来定义,耦合长度就是奇模和偶模产生“拍”的长度的一半。因此,耦合长度可计算为

$$L_c = \frac{\pi}{|\beta_{\text{even}} - \beta_{\text{odd}}|} = \frac{\lambda}{2|n_{\text{even}} - n_{\text{odd}}|} \quad (1)$$

式中 n_{even} 和 n_{odd} 分别是奇模和偶模的有效折射率。利用全矢量光束传播法求出两偏振态在工作波长为 1.55 μm 处的光纤耦合长度,通过合理选取光纤长度,可以实现将所有光功率耦合到 C 波导中。在其他波段,由于模式折射率的不匹配,光功率耦合效率较低,从而实现波长的选择性耦合。

从图 1 可以看到,纤芯区结构具有高度对称性,因此 A,B,C 3 个波导 x, y 偏振态模式有效折射率近似相等。不失一般性,本文主要讨论 x 偏振情形。为了使得 A,B,C 3 个波导的基模模式有效折射率仅在某一频率点相匹配,需分别求出 A,B,C 3 个波导基模模式折射率随 d_c 的变化关系。图 1 所示结构中,A 波导和 C 波导结构完全相同,因此只需求出 A 波导和 B 波导基模模式折射率随 d_c 的变化关系。由于对 A 波导进行高折射率掺杂,所以其模式有效折射率随波导直径的增加而变大;由于对 B 波导进行低折射率掺杂,所以其模式有效折射率随波导直径的增加而变小。由图 2 可以发现,两波导的模式有效折射率大小及有效折射率曲线的斜率都有很大差异,能够实现真正意义上的单频率点匹配。由图 2 可知,当 $d_c/\Lambda = 2.77$ 时,两波导基模模式有效折射率实现匹配,此时 A,B,C 波导能够实现谐振。因此,本文中的滤波器结构的谐振通道直径

d_c 取为 2.77λ 。

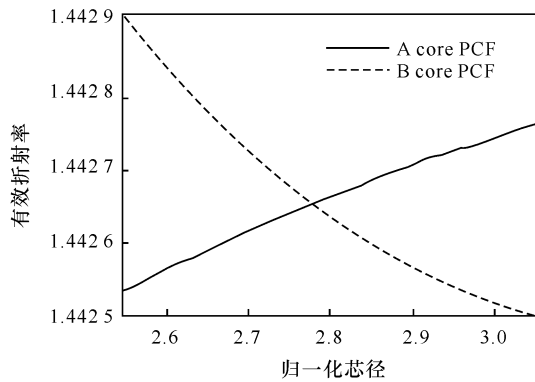
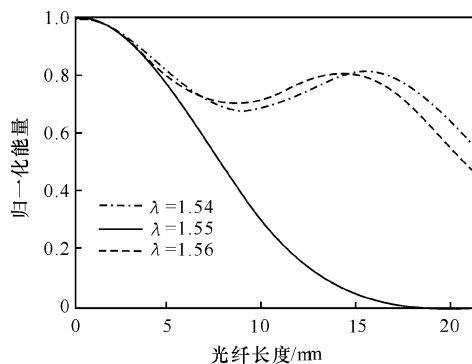


图2 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 纤芯模式有效折射率与纤芯直径的关系曲线

Fig. 2 Variation of the value of n_{eff} as a function of d_c/λ at $1.55 \mu\text{m}$

2 仿真结果及性能分析

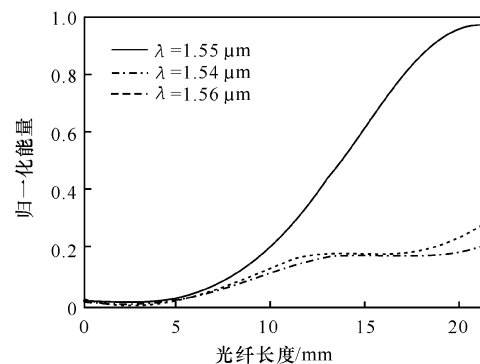
为了分析带通滤波器的性能, 采用全矢量光束



(a) A波导中光功率随传输距离的变化

传播法对带通滤波器进行数值仿真。光波从A波导输入, 此时, 光场集中在A波导区, C波导区光场能量为零。图3是A, C波导区光功率随传输距离的变化情况。可以看到, 由于在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处满足谐振条件, A波导与C波导之间发生强烈的耦合; 全部光功率在A波导和C波导之间周期性交换, 交换周期即为耦合长度; 由光束传播法, 通过模拟计算可以得到TE模和TM模在A波导和C波导横截面上的场强分布。由场强分布可以得出 x 和 y 偏振态耦合长度分别为 $21.336 \mu\text{m}$ 和 $24.311 \mu\text{m}$ 。由于在波长 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.56 \mu\text{m}$ 处3个波导的模式有效折射率不完全匹配, 不满足谐振条件, 此时A波导与C波导之间仅有部分能量发生耦合。

图4给出当光纤长度为 22.8 mm (x 和 y 偏振态下耦合长度平均值) 时两基模的耦合过程。LP₀₁模式场从A波导输入(如图4(a)所示), 通过谐振通道B逐渐向C波导耦合(如图4(b), (c), (d)所示),



(b) C波导中光功率随传输距离的变化

图3 光功率随传输距离的变化

Fig. 3 Normalized power versus length of fiber

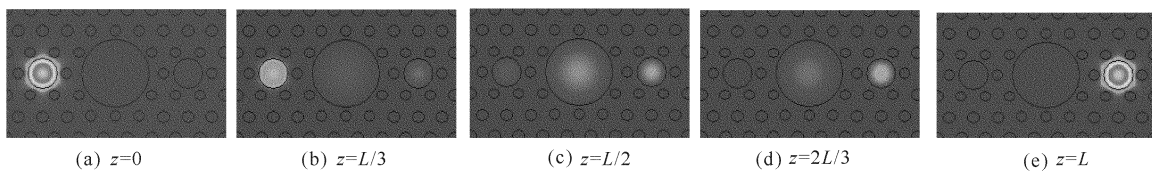


图4 模场的分布

Fig. 4 Snapshots of electric distribution

并最终耦合到C波导中(如图4(e)所示)。

为了进一步说明该三芯光子晶体光纤带通滤波器的窄带滤波特性, 考察入射场波长范围为 $1.5 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 时的能量耦合情况。图5给出了在 22.8 mm 处C波导能量输出情况, 由图5可见, A波导和C波导只在波长 $1.5 \mu\text{m}$ 附近发生耦合, 且带通滤波器具有比较窄的带宽, 在损耗低于

-3 dB 条件下, 带宽(FWHM)仅为 8.9 nm 。值得提出的是, 通过调整纤芯内包层空气孔大小, 可以实现对耦合长度和带宽的调节。增加内包层空气孔大小, 纤芯与包层的折射率差将变大, 将会导致纤芯对各自模式的强束缚, 耦合将变得困难, 耦合长度将变长, 带宽将变窄。反之, 耦合将变得容易, 耦合长度将变短, 带宽将变宽。体现出光子晶体光纤滤

波器设计自由度高,结构变化多的优点;能够满足实际中的不同需要。

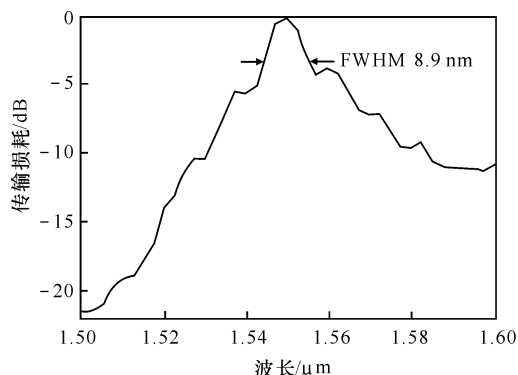


图5 三芯光子晶体光纤带通滤波器工作特性
Fig. 5 Bandpass filtering characteristics of three-core PCF

图6给出了只存在A波导和B波导(普通双芯结构)时的工作特性,比较图5和图6可以发现,三芯结构滤波器的旁瓣(sidelobes)能够很好地被压制。当光波从A波导输入时,由于A波导与B波导基模模式有效折射率在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处匹配,将发生第一次选择性耦合,滤除部分非标准信号;由于C波导与A波导具有完全相同的结构,故C波导和B波导基模模式有效折射率在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处也匹配,此时B波导与C波导间将发生第二次选择性耦合,进一步滤除非标准信号。通过两次选择性耦合,实现对非标准信号的有效压制,由图5还可以发现,在中心波长 $1.5\ \mu\text{m}$ 两侧损耗不对称,我们认为这是由波长变化引起的,波长越长波导间越容易耦合,损耗也越低。

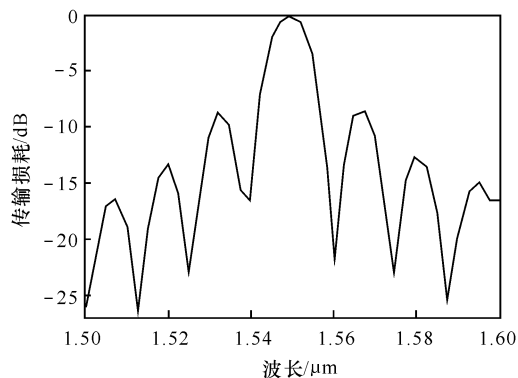


图6 双芯光子晶体光纤带通滤波器工作特性
Fig. 6 Bandpass filtering characteristics of dual-core PCF

3 结论

通过选择合适的结构参量,在三芯光子晶体光纤中可以实现谐振耦合现象。设计了一种基于谐振耦合现象的三芯光子晶体光纤带通滤波器,使得在中心波长产生强烈的耦合,而在中心波长附近不耦合或耦合效率较低,从而达到选择性耦合的目的,可以实现特定波长的滤波。设计的三芯光子晶体光纤滤波器,器件长度为 $22.8\ \text{mm}$;在损耗低于 $-3\ \text{dB}$ 前提下,工作带宽仅为 $8.9\ \text{nm}$,表现出结构简单,传输损耗低,通带带宽窄的优点。

参考文献:

- [1] KITAYAMA K, ISHIDA Y. Wavelength-selective coupling of two-core optical fiber; application and design[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1985, 2(1):90-94.
- [2] VENGSARKAR A M, LEMAIRE P J, JUDKINS J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1):58-65.
- [3] RUSSELL P St J. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(12):358-362.
- [4] CHEN M Y, ZHOU J. Mode converter based on mode coupling in an asymmetric dual-core photonic crystal fiber [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, 10(11):115304-115307.
- [5] SAITOH K, SATO Y, KOSHIBA M. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal couplers [J]. Optics Express, 2003, 11(24):3188-3195.
- [6] ZHANG L, YANG C. Polarization-dependent coupling in twin-core photonic crystal fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(5): 1367-1373.
- [7] L/GSGAARD J, BANG O, BJARKLEV A. Photonic crystal fiber design for broadband coupling [J]. Optics Letters, 2004, 29(21):2473-2475.
- [8] SUN Xi-wen. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism [J]. Optics Letters, 2007, 32(17):2484-2486.
- [9] CHEN Ming-yang, ZHANG Yong-kang, YU Rong-jin. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber and its application[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(5):390-392.