

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.216

表面等离子体共振型光子晶体光纤 偏振滤波器性能优化设计方法

贾平岗, 左方俊, 刘磊, 安国文

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要:以一种常见的光子晶体光纤为载体,利用金属填充物和纤芯周围折射率环境结构的不对称性,提出了一种基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤偏振滤波器性能优化设计方法。研究发现,通过对光子晶体光纤纤芯和金属填充物周围结构的特殊设计,可有效调控周围材料的有效折射率,以实现金属等离子体模式的双折射效应和光纤纤芯模式的双折射特性。因此,当纤芯模式和金属的表面等离子体模式满足相位匹配条件时,即可达到偏振滤波的效果,并获得很好的消光比,而不需要对光子晶体光纤的结构进行复杂设计,降低了器件制备难度,避免了所设计的光纤结构无法实现实际制备的问题。

关键词:光子晶体光纤;偏振滤波器;表面等离子体共振;有限元分析

中图分类号: TN 253

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2021)09-139-08

Optimization design method of surface plasmon resonance based photonic crystal fiber polarization filter

JIA Pinggang, ZUO Fangjun, LIU Lei, AN Guowen

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, P. R. China)

Abstract: In this paper, a method for optimizing the performance of photonic crystal fiber (PCF) polarization filter based on the surface plasmon resonance (SPR) effect was proposed. The method was realized by using the asymmetry of the metal filler and the refractive index environment around the core. The study shows that the effective refractive index of the surrounding materials could be effectively controlled by the special design features of the core and metal filler of the photonic crystal fiber to realize the birefringence effect of the metal plasma mode and the birefringence of the core mode of the fiber. Therefore, when the core mode and metal surface plasmon mode satisfy the phase matching conditions, the polarization filtering effect could be achieved, and a good extinction ratio could be obtained without complex structure design of the photonic crystal fiber, which reduced the difficulty of device preparation and solved the problem that the designed fiber structure could not realize the actual preparation.

Keywords: photonic crystal fiber; polarization filter; SPR; finite element analysis

收稿日期:2021-06-01 网络出版日期:2021-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075505)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52075505).

作者简介:贾平岗(1991—),男,副教授,主要从事光纤器件和光纤传感器技术研究,(E-mail)pgjia@nuc.edu.cn.

表面等离子共振(surface plasmon resonance, SPR)是在入射光的激励下,导电电子在正负介电常数材料界面处的共振振荡现象^[1-2]。SPR 是一种物理光学现象。当一束单色偏振平面波以一定的角度入射到玻璃表面被涂覆的金属层或金属丝填充的位置时,当波矢和等离子体振荡频率相匹配时,光能量即可耦合至金属表面而引起表面等离子共振现象。表面电荷振荡与光电磁场的相互作用使表面等离子体激元(surface plasmon polariton, SPP)具有许多独特而有意义的性质^[3-4]。其中,基于 SPR 效应的光子晶体光纤偏振滤波器也是一个非常重要的分支。

自从 Jorgenson and Yee 在 1993 年提出以光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)为载体激发表面等离子激元模式开始,许多基于 SPR 效应的光纤功能性器件开始出现。而基于 SPR 效应的 PCF 偏振滤波器更是一直被国内外学者所关注。2008 年, Lee 等^[5]研究了 SPR 的耦合特性,并观察到了强烈的高偏振特性和依赖于波长的透射光谱。2011 年 Nagasaki 等^[6]通过在 PCF 包层空气孔中填充金属丝观察到了 PCF 光谱依赖于 SPR 效应的偏振特性。然而,为了获得更好的消光比,他们在光纤包层中填充了三根金属丝。2016 年, Liu 等^[7]提出了一种可调谐光纤偏振滤波器,方法是在一些直径不等的气孔之间填充金丝。Yogalakshmi 等^[8]设计了一种双包层光子晶体光纤,它在大气孔和小气孔之间引入了一根金丝。通过比较相关文献,笔者发现许多研究工作通过专注于改变光子晶体光纤结构去试图获得相对良好的消光比,这些 PCF 结构设计得非常复杂^[5, 9-10]。虽然这些结构可以得到一个较好的偏振滤波特性,但是在实际制备过程中,极易由气孔的塌缩变形等因素影响而使偏振滤波波长发生漂移^[11]。在光子晶体光纤拉制过程中,要保证微结构气孔不膨胀不塌缩,同时保证所有的气孔在最终拉制完成时都保持在特定的位置本身就比较困难^[12-13]。因此,为了获得很好的消光比而将光纤微结构设计的非常复杂,会成倍增加滤波器的制备难度,降低工程应用的可能性。

如何利用光子晶体光纤微结构来设计基于 SPR 效应的偏振滤波器并同时能够获得较好的消光比特性是目前光纤结构设计者所需要考虑的问题。针对该问题,文中以一种常见的基于金属填充的具有三角晶格阵列的光子晶体光纤,在基于 SPR 效应的光子晶体光纤偏振滤波器的设计过程中通过对局部晶格结构参数进行调整和设计,既可以提高滤波性能,又具有结构简单、容易制造的优点。

1 光纤结构模型及理论分析

为了研究偏振滤波器的光场传输特性,笔者采用有限元法并将理想匹配层作为整体仿真结构的边界辐射吸收层。使用常用的基于表面等离子共振的光子晶体滤波器的结构作为载体来分析局部结构参数调整在仿真设计中的作用。由于所设计结构的高度对称性,在仿真中仅需计算原结构的 1/4,这样可以大大减少计算时间。另外,水平方向和垂直方向的外边界条件分别设定为理想电导体和理想磁导体。滤波器的横截面如图 1 所示。图 1 中 2 个黄色圆圈代表在 2 个气孔内壁涂覆的金膜,金的相对介电常数由 Drude-Lorentz 模型^[6]定义为

$$\epsilon(m) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_d)} - \frac{\Delta\epsilon \cdot \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) + j\Gamma_L\omega}, \quad (1)$$

式中: $\epsilon(m)$ 为金的相对介电常数; $\epsilon_{\infty}=5.9673$ 为高频时金属的介电常数; $\Delta\epsilon=1.09$ 是加权因子; ω 为入射光的角频率; ω_D 和 γ_d 为金的等离子体频率和阻尼频率,其中 $\omega_D/2\pi=2113.6$ THz, $\gamma_d/2\pi=15.92$ THz, Ω_L 和 Γ_L 代表洛伦兹振荡的频率和光谱宽度,其中 $\Omega_L/2\pi=650.07$ THz, $\Gamma_L/2\pi=104.86$ THz。

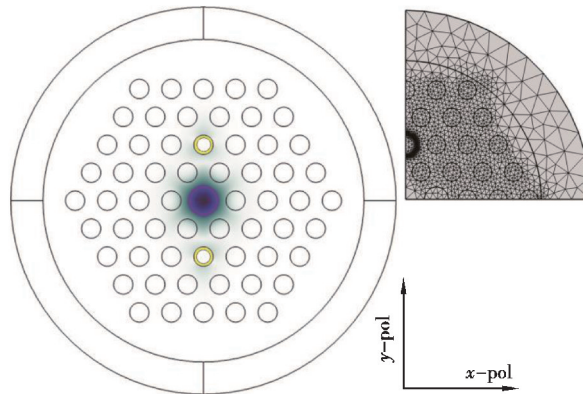


图 1 光子晶体光纤滤波器的横截面示意图

Fig. 1 Cross-section view of the PCF filter

光纤材料为熔融二氧化硅,其折射率通过 Sellmeier 方程^[14]来定义,为

$$n^2 - 1 = \frac{0.696\ 166\ 3\lambda^2}{\lambda^2 - 0.068\ 404\ 3^2} + \frac{0.407\ 942\ 6\lambda^2}{\lambda^2 - 0.116\ 241\ 4^2} + \frac{0.897\ 479\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896\ 161^2}, \quad (2)$$

式中: λ 为光的波长, μm 。

光纤传输的衰减常数 α 和有效折射率的虚部成正比,具体关系为

$$\alpha = 2k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (3)$$

式中: k_0 为自由空间的波数; n_{eff} 为纤芯模式的有效折射率。光纤传输损耗系数被定义为

$$\alpha_{\text{loss}} = \frac{10}{Z} \log\left(\frac{P_0}{P(z)}\right) \quad (4)$$

式中: P_0 是参考平面 $z=0$ 处的能量,且 $P(z) = P_0 e^{-\alpha z}$ 。综合上述 2 个等式,可以得到 PCF 的限制损耗

$$L_{\text{loss}} = 10 \log(e) \alpha = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[n_{\text{eff}}]. \quad (5)$$

对于 PCF 滤波器性能来说,最重要的评估标准之一就是在一个偏振方向上损耗足够高,而另外一个偏振方向上的偏振损耗较低。这样,才能保证一个较好的消光比 E ,为

$$E = 20 \lg \exp[(a_2 - a_1)L], \quad (6)$$

式中: a_1 和 a_2 分别代表 X 偏振和 Y 偏振的限制损耗; L 是光纤长度,有效光学带宽的波长范围可以定义为传输低于 -20 dB 或高于 20 dB。

2 双折射特性对光子晶体光纤偏振滤波性能的影响

着重介绍纤芯和金属填充物周围介质有效折射率变化对模式色散关系的影响以及如何利用该方法对基于 SPR 的 PCF 偏振滤波器进行有效设计同时避免结构设计的复杂性。笔者分析基于 SPR 的 PCF 滤波器的偏振滤波特性(即色散关系)。当 PCF 本身不具有双折射效应时,纤芯模式和 SPP 模式的色散关系如图 2 所示。当光纤纤芯模式和金属 SPP 模式有效折射率相匹配时(满足相位匹配条件),光纤纤芯传导模式和金属被激发的等离子体模式之间发生强烈的能量耦合。可以看到,在 $1\ 550$ nm 的通信波段, Y 偏振方向(y -pol)的损耗非常高,因此可以设计为光纤偏振滤波器。然而,当把注意力集中在 X 偏振方向(x -pol)的损耗上时,该偏振方向在 $1\ 550$ nm 波长处同样具有不小的损耗峰值。换言之,如果使用这种类型的滤波器,有效折射率(effective refractive index, ER)并不好,信号之间的干扰损耗将变得非常大。

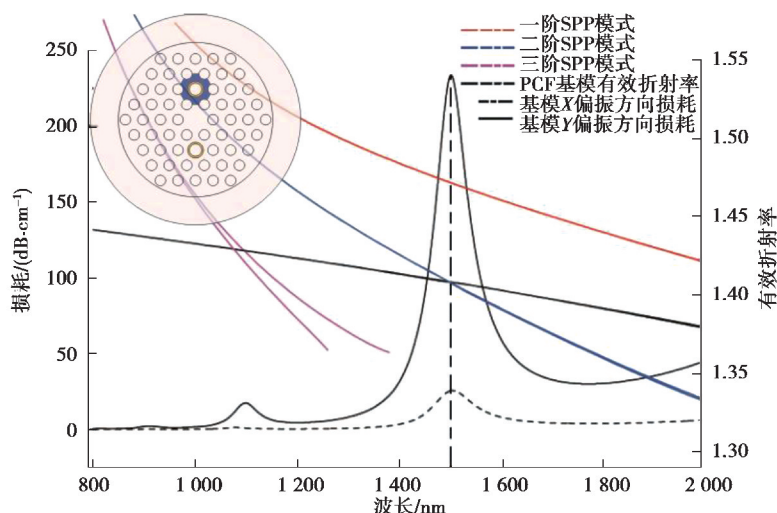


图 2 纤芯模式、SPP 模式的有效折射率以及 x 、 y 纤芯偏振芯模的限制损耗随波长的变化情况

Fig. 2 Effective indexes of the core mode, the SPP modes and the confinement loss of the x and y -polarized core modes as a function of wavelength

为了提高过滤效果,将 d_1 从 $1.2 \mu\text{m}$ 变为 $1.8 \mu\text{m}$ 时,滤波器的色散关系如图 3 所示。可以看出:当气孔 d_1 直径增大时,光纤纤芯模式不同偏振方向的有效折射率曲线出现分离,光纤的双折射效应增强,因此,纤芯模式有效折射率曲线和 SPP 模式有效折射率曲线交点间的间距变大,由此可以初步分离 2 个偏振方向的损耗峰。如果单独改变金属膜两侧气孔的直径,那么随着气孔 d_2 直径的增加,类似于纤芯模式的双折射特性,处于不同偏振方向的同阶 SPP 模式的有效折射率即可被分离,由于气孔直径 d_2 的增加,使金属层周围介质有效折射率发生变化,SPP 模式的有效折射率表现出类似于光纤纤芯模式的双折射效应,称之为“SPP 的准双折射效应”,如图 4 所示。

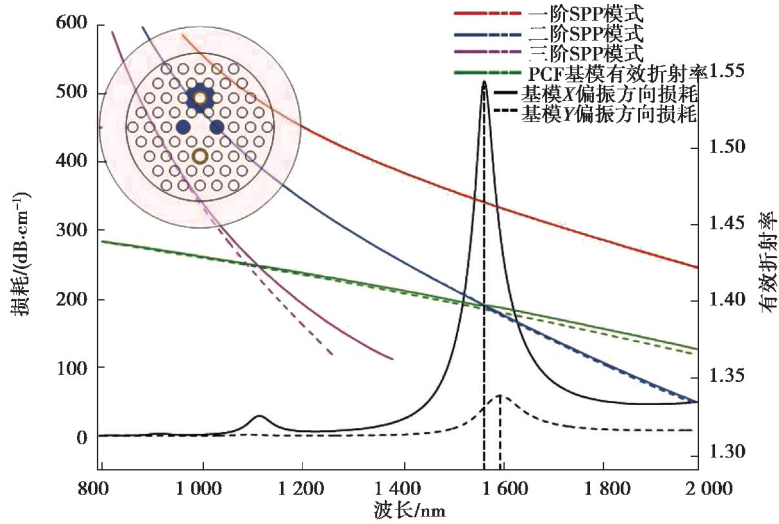


图 3 光纤双折射条件下,纤芯模式、SPP 模式的有效折射率以及 x 、 y 纤芯偏振模式的限制损耗随波长的变化情况

Fig. 3 The effective indexes of the core mode, the SPP modes and the confinement loss of the x and y -polarized core modes as a function of wavelength under the condition of fiber birefringence

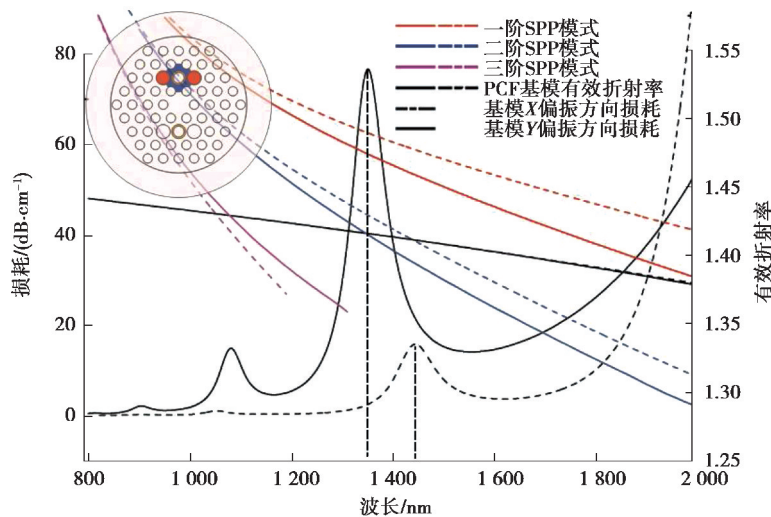


图 4 SPP 准双折射效应条件下,纤芯模式、SPP 模式的有效折射率以及 x 、 y 纤芯偏振模式的限制损耗随波长的变化情况

Fig. 4 The effective indexes of the core mode, the SPP modes and the confinement loss of the x and y -polarized core modes as a function of wavelength under the condition of SPP quasi-birefringence effect

如图5所示,通过光纤纤芯模式的双折射效应和金属等离子体模式的准双折射特性,不同偏振方向的2个损耗峰会被分离而得到一个较好的偏振消光比,同时光纤结构整洁易于制造。由文献可以看出,由于金属周围环境中折射率分布的不对称性,所有这些结构都表现出SPP的准双折射性质^[10, 15],也就是说,可以通过改变金属丝周围气孔的不对称性来微调滤波器的损耗峰位置及偏振性能。图5所示为随着 d_1 和 d_2 同时从 $1.2\ \mu\text{m}$ 变为 $1.8\ \mu\text{m}$ 时,对滤波器色散关系的影响。从图5中可以看到被完全分离的损耗峰,这是光纤纤芯模式的双折射效应和“SPP模式的准双折射效应”共同作用的结果。

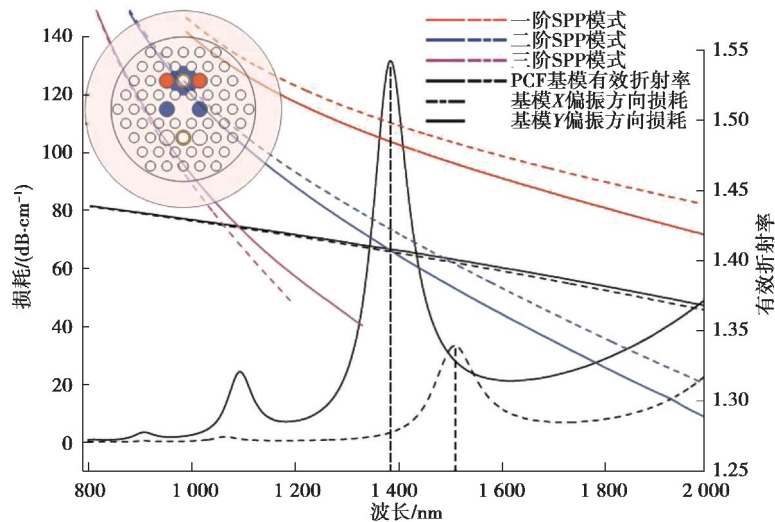


图5 在光纤双折射效应和SPP模式的准双折射效应共同作用下,纤芯模式、SPP模式以及 x 和 y 偏振纤芯模式限制损耗的有效折射率随波长的变化情况

Fig. 5 The effective refractive index of core mode, SPP mode and x and y polarization core mode loss changes with wavelength under the combined action of birefringence effect and quasi birefringence effect of SPP mode

3 局部结构参数调整在滤波器设计中的应用

如图6(a)所示,当滤波器的结构完全对称时,即纤芯和金属填充层周围结构保持严格对称,两者周围环境有效折射率分布完全对称而不表现出任何双折射效应,则2个正交方向上的损耗峰值不会分离。图6(a)中的蓝色部分代表金属周围的环境。通过图6(a)和图6(c)的对比,可以看出,如果只改变金属填充层两侧气孔直径大小,打破周围结构的对称性,那么就会将2个正交方向SPP模式的有效折射率分离。正是由于这2个气孔的变化导致了金属薄膜周围环境折射率分布的不对称性,从而导致了SPP模式的准双折射效应。同时,再结合图6(b)中所示的PCF的双折射效应,在2个正交方向上SPP模式的有效折射率曲线和纤芯模式的有效折射率曲线的焦点(即相位匹配点)相比于没有任何双折射特性的光子晶体光纤结构(如图6(a)所示)会被分离开来,代表滤波器的损耗峰值被分离。根据式(6)可知,通过引入纤芯模式的双折射效应和SPP模式的准双折射效应,在极小的结构变化下可以保证偏振滤波器优良的消光比(extinction ratio, ER),如图6(d)所示。通过图6(d)可以看出偏振滤波器的结构设计变得比较简单。纤芯和SPP模式双折射特性的引入使光子晶体光纤偏振滤波器性能明显提高,如图7所示。

同时,介于光子晶体光纤优异的结构可调特性,纤芯模式和SPP模式的双折射特性仅仅依靠其两侧空气孔直径大小的调控,并不需要对光纤结构进行大面积、非标准化的设计,极大地降低了实际制备难度。如图8所示,以常见的光子晶体光纤制备方法-堆积法为例,可以通过将简单的薄壁石英管放置在纤芯和金属填充物两侧即可实现纤芯模式和SPP模式的双折射调控能力。其制备过程和常见的光子晶体光纤制备过程几乎一致,不会在实际制备过程中不会增加任何额外难度。

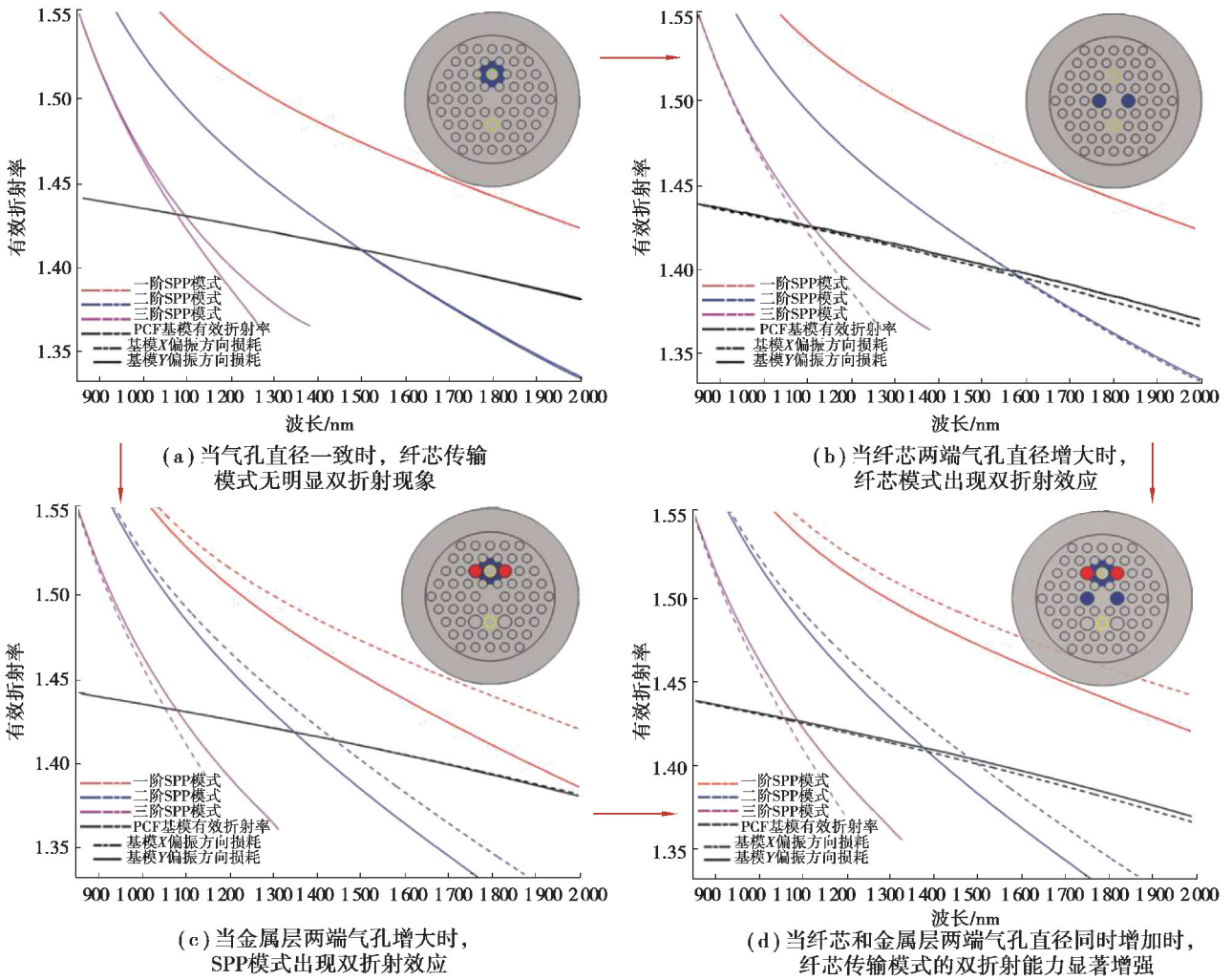


图 6 局部参数调整在表面等离子体共振型光子晶体光纤偏振滤波器设计中的应用

Fig. 6 Application of local parameter adjustment in the design of PCF polarization filter based on SPR

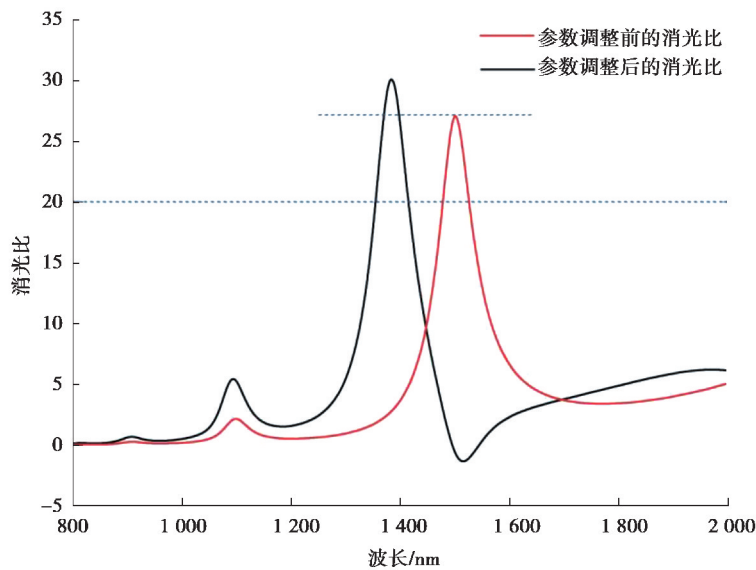


图 7 纤芯模式和 SPP 模式的双折射特性共同作用对光子晶体光纤偏振滤波器消光比的影响对比

Fig. 7 Influence of birefringence characteristics of core mode and SPP mode on ER of PCF polarization filter

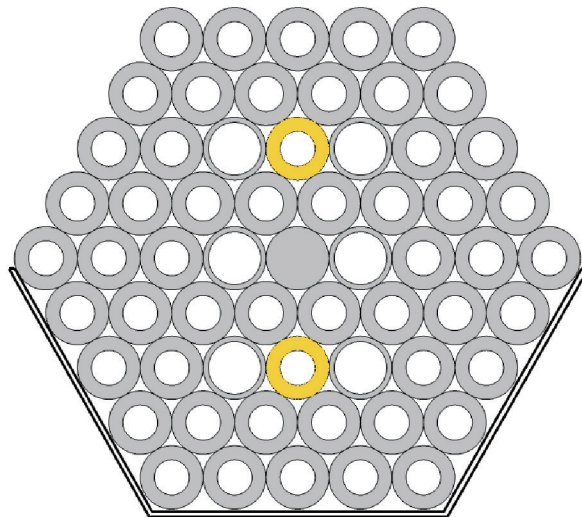


图8 易于实际制备的光纤偏振滤波器的优化结构

Fig. 8 Optimized structure of the easy prepared fiber-optic polarization filter

4 结 语

文章以一种常见的基于表面等离子体共振的光子晶体光纤为载体,通过局部参数调整设计,提出了基于SPR效应的PCF偏振滤波器性能优化设计方法。研究表明:在金属填充/涂层光子晶体光纤偏振滤波器的设计中打破结构对称性,可以获得很好的消光比,而不需要对光子晶体光纤的结构进行复杂设计,降低了器件制备难度,避免了所设计的光纤结构无法实现实际制备的问题。

参考文献:

- [1] 关春颖,苑立波,史金辉.微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析[J].光学学报,2011,31(2):42-45.
Guan C Y, Yuan L B, Shi J H. Characteristics analysis of microporous fiber surface plasmon resonance sensing[J]. Acta Optics Sinica, 2011, 31(2): 42-45. (in Chinese)
- [2] 赵华新,蒋永翔,罗天穹,等.基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J].光学学报,2012,32(6):240-245.
Zhao X H, Jiang Y X, Luo T Q, et al. Hollow-core optical fiber sensor based on the principle of surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 240-245. (in Chinese)
- [3] Ouyang Q, Zeng S, Jiang L, et al. Sensitivity enhancement of transition metal dichalcogenides/silicon nanostructure-based surface plasmon resonance biosensor[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28190.
- [4] 江秀明,陈志春,杨绍明,等.光纤表面等离子体共振传感器研究进展[J].传感技术学报 2003(1):74-77,79.
Jiang X M, Chen Z C, Yang S M, et al. Research progress of optical fiber surface plasmon resonance sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2003(1): 74-77,91. (in Chinese)
- [5] Lee H W, Schmidt M A, Tyagi H K, et al. Polarization-dependent coupling to plasmon modes on submicron gold wire in photonic crystal fiber[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(11): 4729.
- [6] Nagasaki A, Saitoh K, Koshiba M. Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled with metal wires into cladding air holes[J]. Optics Express, 2011,19(4): 3799-3808.
- [7] Liu Q, Li S, Li J, et al. Tunable fiber polarization filter by filling different index liquids and gold wire into photonic crystal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2484-2490.
- [8] Yagalakshmi S, Selvendran S, Raja A S. Design and analysis of a photonic crystal fiber based polarization filter using surface plasmon resonance[J]. Laser Physics, 2016, 26(5): 056201.
- [9] 闫欣,王海洋.金涂覆光子晶体光纤偏振滤波器的特性分析[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(11):

1540-1544.

Yan X, Wang H Y. Characteristic analysis of gold-coated photonic crystal fiber polarization filter[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(11): 1540-1544. (in Chinese)

- [10] Zi J, Li S, Chen H, et al. Photonic crystal fiber polarization filter based on surface plasmon polaritons[J]. Plasmonics, 2016, 11(1): 65-69.
- [11] Wang H, Xin Y, Li S, et al. Design of the polarization filter based on photonic crystal fiber with Au-coated air holes[J]. Optical & Quantum Electronics, 2016, 48(11): 512.
- [12] 张炳涛, 陈月娥, 赵兹罡, 等. 光子晶体光纤的发展和应用[J]. 应用物理, 2019, 9(1): 30-50.
Zhang B T, Chen Y E, Zhao Z G, et al. Development and application of photonic crystal fibers[J]. Applied Physics, 2019, 9(1): 30-50. (in Chinese)
- [13] 刘兆伦, 刘建民, 马彪, 等. 光子晶体光纤的制备和应用进展[J]. 大连民族大学学报, 2005(1): 39-43.
Liu Z L, Liu J M, Ma B, et al. Progress in the preparation and application of photonic crystal fibers[J]. Journal of Dalian Minzu University, 2005(1):39-43. (in Chinese)
- [14] Berlyn, Brixner. Refractive-index interpolation for fused silica[J]. Journal of the Optical Society of America 1967, 57(5): 674-676.
- [15] An G, Li S, Zhang W, et al. A polarization filter of gold-filled photonic crystal fiber with regular triangular and rectangular lattices[J]. Optics Communications, 2014, 331: 316-319.

(编辑 詹燕平)