

doi:10.3788/gzxb20184712.1206002

非对称性对光子晶体光纤偏振相关滤波特性的影响

姜凌红¹, 王超¹, 韩颖², 张银蒲¹, 赵兴涛², 侯蓝田², 齐跃峰²

(1 唐山学院 智能与信息工程学院, 河北 唐山 063000)

(2 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 基于表面等离子共振效应, 提出了三种不同非对称因素引入的金镀膜偏振相关滤波光子晶体光纤, 利用全矢量有限元法研究了光子晶体光纤偏振相关滤波传输特性. 当非对称纤芯模单独作用时, 波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 x 与 y 偏振方向纤芯模损耗分别为 5.58 dB/cm 和 461.58 dB/cm , 两偏振方向损耗比为 83; 当非对称金属表面等离子模单独作用, 且镀膜厚度为 55 nm 时, 其谐振波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处 x 与 y 偏振方向纤芯模损耗分别为 2.02 dB/cm 和 412.91 dB/cm , 两偏振方向损耗比高达 204, 镀膜厚度 19.5 nm 时其谐振波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 x 与 y 偏振方向纤芯模损耗分别为 5.29 dB/cm 和 536.25 dB/cm , 两偏振方向损耗比为 101; 当纤芯模和表面等离子模同时引入非对称因素时, 通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 y 偏振纤芯模谐振强度高达 802.08 dB/cm , 而 x 偏振纤芯模损耗仅为 5.57 dB/cm , 两偏振方向损耗比为 144. 数值比较可知, 在金属表面等离子模中或两种模式同时引入非对称因素, 可获得两偏振方向偏振损耗比更高的强偏振相关滤波传输特性的光子晶体光纤, 该研究对光子晶体光纤偏振相关滤波器及相关偏振器件的设计与应用具有一定参考意义.

关键词: 光子晶体光纤; 非对称性; 表面等离子共振; 偏振相关滤波; 谐振强度; 相位匹配; 模式耦合

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)12-1206002-9

Effect of the Asymmetric Factor on the Polarization-dependent Filter of Photonic Crystal Fiber

JIANG Ling-hong¹, WANG Chao¹, HAN Ying², ZHANG Yin-pu¹,
ZHAO Xing-tao², HOU Lan-tan², QI Yue-feng²

(1 Intelligence and Information Engineering College, Tangshan University, Tangshan, Hebei 063000, China)

(2 State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University,
Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Based on the surface plasmon resonance effect, the gold-coated Photonic Crystal Fibers (PCFs) with introduction of three different kinds of asymmetric factors with polarization-dependent filter characteristics were proposed. The polarization-dependent filter characteristics were analyzed by the full vectorial finite element method. When the asymmetric factor is only introduced in the fiber core mode, the resonance losses of x - and y -polarized core modes are 5.58 dB/cm and 461.58 dB/cm at the communication wavelength of $1.55 \mu\text{m}$, respectively, the resonance loss ratio in two polarization directions is 83. When the asymmetric factor is only introduced in the surface plasmon mode, the resonance losses of x - and y -polarized core modes with the coating thickness of 55 nm are 2.02 dB/cm and 412.91 dB/cm at the resonance wavelength of $1.31 \mu\text{m}$, respectively, the resonance loss ratio in two polarization directions is up to 204. The resonance losses of x - and y -polarized core modes with the

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.61735011), 河北省自然科学基金 (Nos.F2018105036, F2018203346), 河北省高等学校科学技术研究项目 (No.BJ2017108), 唐山市科技计划项目 (No.17130254a), 唐山学院博士创新基金项目和唐山市室内定位技术重点实验室开放课题资助.

第一作者: 姜凌红 (1983-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤器件. Email: no1shajia@163.com

收稿日期: 2018-07-09; **录用日期:** 2018-08-27

<http://www.photon.ac.cn>

coating thickness of 19.5 nm are 5.29 dB/cm and 536.25 dB/cm at the resonance wavelength of 1.55 μm , respectively, the resonance loss ratio in two polarization directions is 101. While the asymmetric factors both in the core modes and the surface plasmon mode are all introduced, the y -polarized resonance strength is up to 802.08 dB/cm at 1.55 μm , the corresponding loss in x polarization is only 5.57 dB/cm, the resonance loss ratio in two polarization directions is up to 144. The numerical comparisons show that the asymmetric factors introduced in the surface plasmon mode or both in two modes can obtain much stronger polarization-dependent filter characteristics with high polarization loss ratio. This work is beneficial for the design and application of the polarization-dependent PCF filters and related polarizers.

Key words: Photonic crystal fiber; Symmetric factor; Surface plasmon resonance; Polarization-dependent filter; Resonance strength; Phase match; Mode coupling

OCIS Codes: 060.5295; 060.2400; 060.2420

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)^[1]的包层由轴向结构不变并以波长量级周期性分布的空气孔组成,具有传统光纤难以实现的传输特性,因而受到学术界和产业界的广泛关注.随着 PCF 研究的不断深入,光纤研制水平的不断提高以及各种光电子器件集成化和光纤化的发展,基于微结构光纤器件的研究已成为一个新的研究热点.保偏 PCF^[2-4]由于具有较高的线偏振态保持能力而被广泛应用于环境稳定性较低的偏振依赖光纤通信系统^[5-8]、光纤激光器^[9]和光纤传感^[10]等领域.随着光纤填充技术的快速发展,通过在 PCF 结构中填充金属材料^[11-16]、液晶^[17]、半导体材料^[18-19]等能够产生新的传输特性,为光通信系统中全光纤网络向大容量、高速率、低功耗快速发开展辟了一条新的路径.在 PCF 结构中填充或者镀膜金属材料,当光与金属相互作用时,光子在金属和介质界面上会激发出一种特殊的表面波,即表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)^[20].当纤芯模与表面等离子模满足相位匹配条件时就能发生表面等离子共振效应,利用其特性可以设计出不同类型的 PCF 偏振相关耦合器.Lee, H. W 等人^[12]基于熔接的新型压力辅助熔融填充技术,通过实验实现了在 PCF 空气孔中 120 nm 金纳米线的填充,同时理论验证了基于金属表面等离子共振效应的强偏振相关传输特性.Zhang, X 等人^[13]通过采用涂覆法和化学气相沉积法在微结构光纤微孔中选择性金属镀膜实现了全光纤偏振器件的制作.Nagaski, A 等人^[14]研究了在光纤纤芯附近包层空气孔中分别填充一个到三个金属丝的 PCF 偏振相关滤波传输特性,发现存在多个谐振响应波长但是其谐振耦合器强度偏小.Xue, J. R 等人^[15]分析了在包层空气孔中进行金属镀膜并填充液体,理论实现了波长 1.311 μm 处 y 偏振方向纤芯模谐振耦合器强度为 508 dB/cm,同一波长处 y 偏振方向与 x 偏振方向纤芯模损耗之比仅为 25 左右. Du, Y 等人^[16]通过在 PCF 包层空气孔填充金属金研究了 PCF 偏振相关滤波特性,而波长 1.55 μm 处谐振耦合强度小于 100 dB/cm.Kaleque, A^[21]报道了基于方形阵列的椭圆孔金属镀膜 PCF,获得了谐振强度为 1 221 dB/cm 的强偏振相关滤波传输特性,但方形阵列椭圆孔 PCF 的制作无疑具有很大的挑战性,且椭圆孔内金属镀膜更增加了制作的难度.近期, Li, M 等人^[22]设计了金丝填充的偏振相关滤波特性 PCF,获得通信波长谐振强度为 330.75 dB/cm 且两偏振方向损耗比为 175 的强偏振相关滤波特性.另外,基于表面等离子共振效应的 PCF 还可用于光纤传感器等领域^[23].而不同非对称因素的引入对基于表面等离子共振效应 PCF 偏振相关滤波特性影响的相关文献未见报道.

本文分析了非对称因素的引入对 PCF 偏振相关滤波特性的影响,分析和比较了非对称因素单独在 PCF 纤芯模和表面等离子模引入、以及同时在这两个模式中引入时产生的偏振相关滤波特性,得到三种类型的通信波段强偏振相关滤波特性 PCF.数值分析与比较可知,在 PCF 纤芯模中单独引入非对称因素,其通信波长处两偏振方向损耗比为 83;在 PCF 的 SPPs 模中单独引入非对称因素可获得通信波长 1.31 μm 两偏振方向损耗比高达 204;在两种模式同时引入非对称因素可获得通信波长 1.55 μm 谐振强度高达 802.08 dB/cm,且对应的两偏振方向损耗比达到 144.因此在 SPPs 模中引入非对称因素是获得 PCF 强偏振相关滤波特性的更好方案,文中所分析的 PCF 偏振相关滤波传输特性为单波带 PCF 偏振相关滤波器的研究和应用提供了重要的参考依据.

1 理论模型

图 1(a)~(c)分别为在纤芯模引入非对称因素、SPPs 模中引入非对称因素、以及纤芯模和 SPPs 模同时

引入非对称因素的 PCF 端面图,将这三类 PCF 分别命名为 PCF_1 、 PCF_2 、 PCF_3 ,其包层都由三角阵列的孔间距为 $\Lambda=2.2\ \mu\text{m}$ 、孔径 $d=1.4\ \mu\text{m}$ 的 5 层空气孔组成,纤芯附近两增大孔孔径为 d_2 ,在包层区域孔径为 d_1 的两空气孔中进行金属镀膜,其中金属镀膜厚度为 t .图 1(b)和(c)显示了两对称镀膜孔垂直向纤芯区域移动距离为 s ,纤芯区域引入一小空气孔 d_c ,小空气孔的引入可以有效地降低纤芯导模有效折射率,促进纤芯模和 SPPs 模的相位匹配,增加两种模式的谐振耦合强度,从而提高特定波长处的两偏振方向损耗比,且谐振响应最大半高全宽值(Full Width at Half Maximum, FWHM)更小,获得了通信波段处更强的偏振相关滤波传输特性.

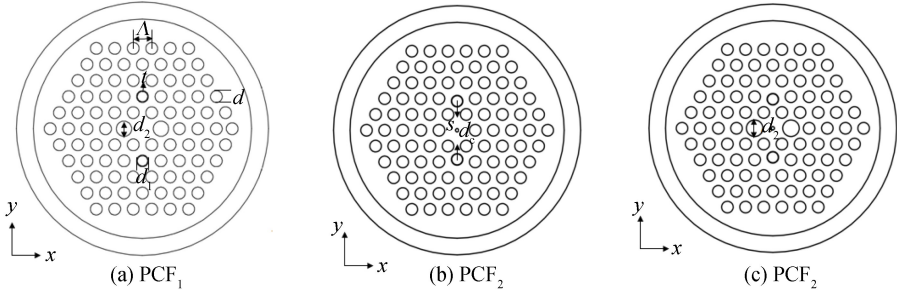


图 1 不同非对称因素的 PCF 端面图

Fig.1 Cross sections of PCFs with different asymmetric factors

光纤基底材料由纯石英材料组成,包层垂直方向两空气孔镀膜材料为金属金,模拟计算时考虑了石英和金属的材料色散,分别由石英材料 Sellmeier 方程^[24]和金属材料金的 Drude-Lorentz 模型^[20]来描述.基于多物理耦合分析软件 Comsol Multiphysics 的有限元法分析 PCF 的谐振耦合特性,三种 PCF 模型的最外层都引入一个完美匹配层作为吸收层,有效地吸收各种入射辐射能量且不产生能量反射,并在最外围采用散射边界条件,进一步消除外界反射波的影响,从而可以更准确地模拟出无限空间内光波的传播常数和损耗.通过有限元法模拟得到 PCF 纤芯基模和各阶表面等离子模的有效传播常数,利用传播常数的虚部可计算出光纤纤芯模式限制损耗,即

$$\alpha = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6 \quad (1)$$

式中 λ 是光的传输波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 是模式有效折射率的虚部,光纤损耗单位为 dB/m.

2 数值模拟与结果分析

为了分析非对称因素的引入对 PCF 偏振相关滤波特性的影响,当纤芯模和 SPPs 模都无非对称因素时,引入 PCF 中纤芯模与 SPPs 模的谐振耦合特性.图 2 为 $\Lambda=2.2\ \mu\text{m}$, $t=0.05\ \mu\text{m}$, $d_2=d=1.4\ \mu\text{m}$ 时, d_1 逐渐变大时 PCF 纤芯模式与 SPPs 模式有效折射率以及纤芯模式损耗随波长的变化.图 2(a) 分析了纤芯模与表

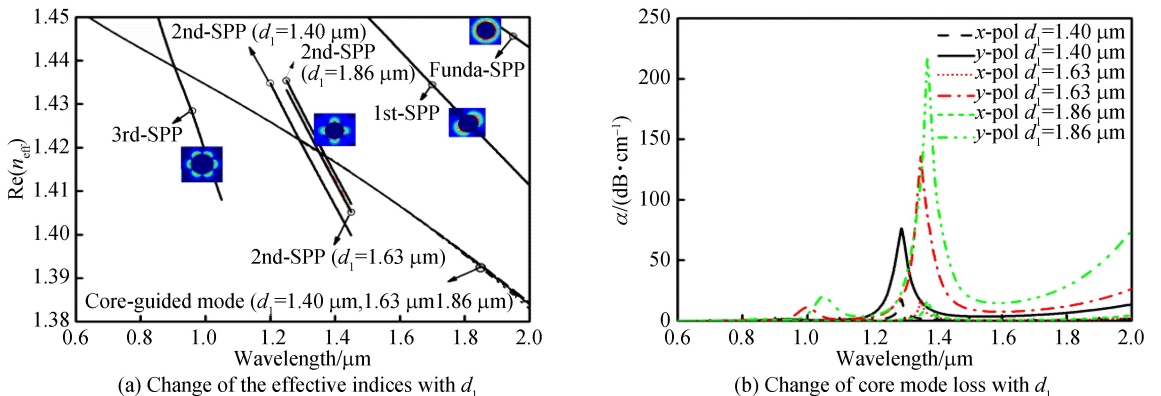


图 2 未引入非对称因素的 PCF 纤芯模与 SPPs 模谐振模式耦合随波长的变化

Fig.2 The resonance coupling between core-guided modes and SPPs modes of the PCF without asymmetric factor as function of wavelength

面等离子模有效折射率实部随波长的变化规律,其插图为基阶到三阶 SPPs 模的模场分布图.由图可知,基阶、一阶 SPPs 模与纤芯模由于相位不能满足匹配条件而未能发生谐振耦合.另外,二阶、三阶表面等离子模与纤芯模都存在相位匹配点,由图 2(b)可知,三阶 SPPs 模式与纤芯模式的相位匹配点所对应的谐振耦合强度极其微弱,其产生的峰值损耗小至可以忽略.因此,以下主要分析二阶 SPPs 模与纤芯模的谐振耦合.由图 2 可知,当 SPPs 模式和纤芯模式结构都是对称时,两偏振方向纤芯模式的谐振响应波长重合,降低了两偏振方向谐振耦合强度之比,不利于单偏振相关滤波传输.随着镀膜孔外径 d_1 逐渐变大,纤芯模与 SPPs 模谐振耦合强度逐渐变大,这是由于当镀膜孔外径越大,金属镀膜产生的表面等离子模式与纤芯模式越接近,使两种模式更容易发生谐振耦合,产生更强的谐振耦合强度.随着 d_1 的逐渐变大,谐振响应波长向长波长方向移动,这是由于 SPPs 模式有效折射率传输随着 d_1 的增大逐渐增大,而纤芯模式传播常数不受镀膜孔外径的影响.

2.1 仅在纤芯模引入非对称因素的 PCF

图 3 为仅在纤芯模中引入非对称因素时,光纤结构参数 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $t = 0.05 \mu\text{m}$, $d = 1.4 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.86 \mu\text{m}$ 固定不变, d_2 由 $1.4 \mu\text{m}$ 增大到 $2.56 \mu\text{m}$ 时 PCF 两偏振方向纤芯模与 SPPs 模式的谐振耦合.如图 3(a)所示,纤芯附近 d_2 的增大降低了两偏振方向纤芯模式传播常数, SPPs 模由于偏离纤芯区域而不受 d_2 改变的影响.因此,纤芯模与 SPPs 模的谐振波长随着 d_2 的增大而逐渐分开并向长波长方向移动.而当 $d_2 = d = 1.4 \mu\text{m}$ 时的两偏振方向纤芯模谐振波长重合且与图 2 分析一致.由图 3(b)可知,谐振耦合强度随着 d_2 的增大而变大,且当 $d_2 = 2.56 \mu\text{m}$ 时,在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 y 偏振方向纤芯模与 SPPs 模发生了表面等离子共振效应,使 y 偏振方向纤芯模损耗高达 461.58 dB/cm ,而同一波长处 x 偏振方向纤芯模与 SPPs 模未发生谐振耦合,其损耗低至 5.58 dB/cm ,获得了 $1.55 \mu\text{m}$ 处损耗比为 83 的高偏振相关滤波特性,实现了通信波长处 y 偏振方向纤芯模由于高损耗被滤除,而 x 偏振纤芯模由于在通信波长处未发生谐振耦合以极低的插入损耗继续传输的偏振相关滤波传输特性.除了需要获得较强的谐振耦合强度以外,较小的谐振响应 FWHM 值是单波带 PCF 偏振相关滤波特性另一个重要的指标参数.仅在纤芯模中引入非对称因素时,谐振响应 FWHM 值为 65 nm .因此,需要进一步降低其谐振响应最大半高全宽值,才能获得更好的 PCF 窄带带阻偏振相关滤波特性.

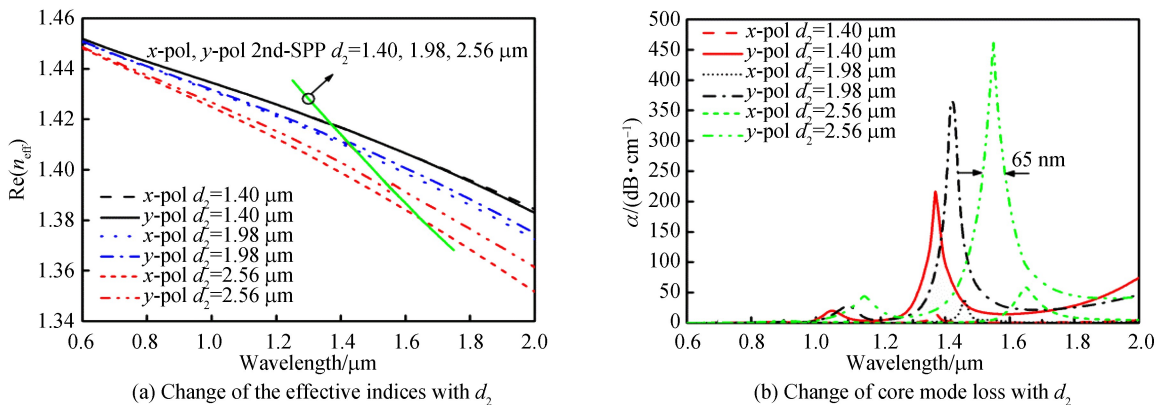


图 3 纤芯引入非对称因素的 PCF 纤芯模与 SPPs 模谐振模式耦合随波长的变化
Fig.3 The resonance coupling between core-guided modes and SPPs modes of the PCF with asymmetric factor introduced in the fiber core mode as function of wavelength

2.2 仅在 SPPs 模中引入非对称因素的 PCF

图 4 为仅在 SPPs 模式中引入非对称因素,即包层两个镀膜空气孔位置改变对 PCF 偏振相关滤波特性的影响.为了获得更强的纤芯模式谐振耦合强度,图 4(a)显示了纤芯空气孔的引入对 PCF 谐振耦合强度的影响.由图 4(a)可知,由于纤芯小空气的引入降低纤芯模式有效折射率而不影响 SPPs 模式有效折射率,两种模式的相位匹配点随着纤芯小空气的引入而发生了红移,实芯 PCF 的相位匹配点为 $1.28 \mu\text{m}$,其对应的谐振耦合强度和 FWHM 值分别为 74.7 dB/cm 和 60 nm .与实芯 PCF 谐振耦合相比,在纤芯区域引入 $d_c = 0.2 \mu\text{m}$ 的小空气孔较大地增大了纤芯模的谐振耦合损耗,谐振耦合波长移至 $1.33 \mu\text{m}$,且其对应的谐振耦合

强度和 FWHM 值分别为 164.4 dB/cm 和 30 nm.因此,纤芯微小空气孔的引入促进纤芯模和 SPPs 模的相位匹配,增加了两种模式的谐振耦合强度同时降低了谐振响应 FWHM 值.另外,文献[25]报道了纤芯引入 $0.2 \mu\text{m}$ 空气孔满足 PCF 拉制实现的最小空气孔条件.图 4(b)和(c)显示了 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $d_1 = d = 1.4 \mu\text{m}$, $t = 0.055 \mu\text{m}$, $d_c = 0.2 \mu\text{m}$ 时,包层两对称金镀膜孔位置不改变($s = 0$)和向纤芯方向竖直移动 $s = 0.4 \mu\text{m}$ 后纤芯模与 SPPs 模的谐振耦合情况.

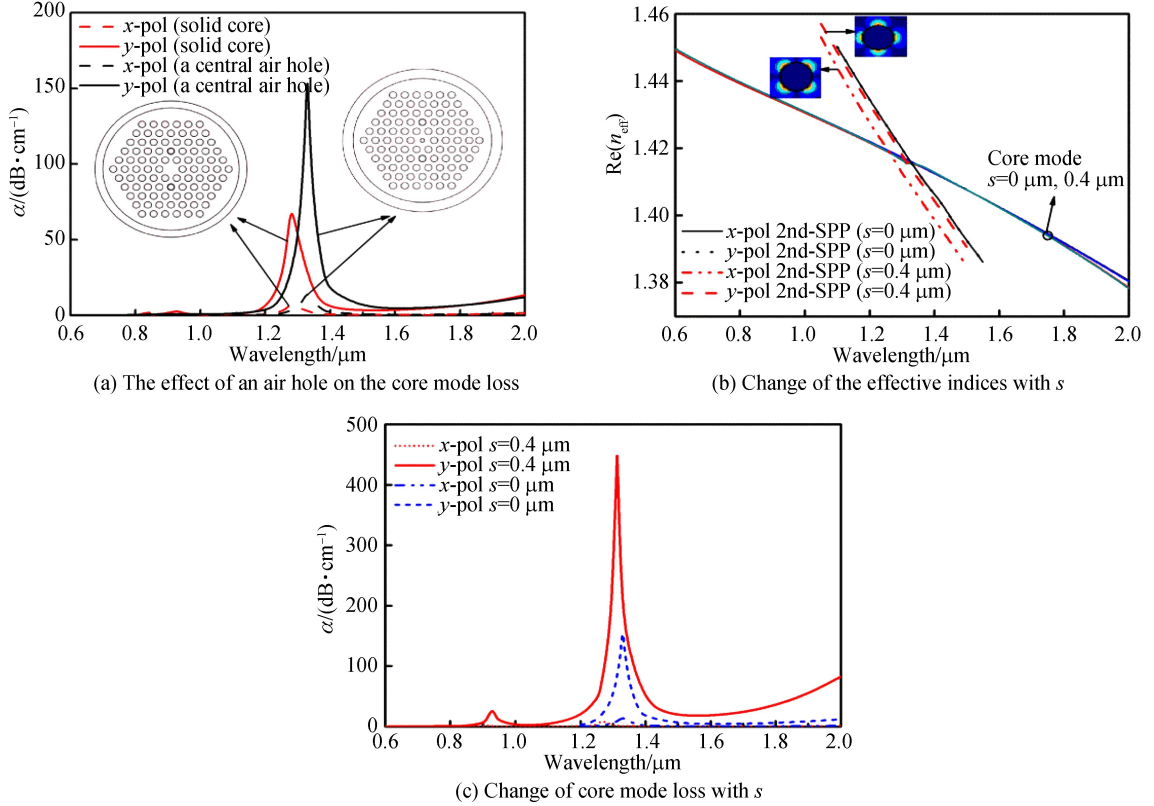


图 4 SPPs 模引入非对称因素的 PCF 纤芯模与 SPPs 模谐振模式耦合随波长的变化

Fig.4 The resonance coupling between core-guided modes and SPPs modes of the PCF with asymmetric factor introduced in SPPs modes as function of wavelength

由图 4(b)可知,纤芯模式传播常数不受镀膜孔位置改变的影响,而当两对称镀膜孔向纤芯方向移动 $0.4 \mu\text{m}$ 时,在表面等离子模中引入非对称因素,产生了非对称的两偏振方向的表面等离子模.图 4(c)显示了当 $s = 0.4 \mu\text{m}$ 时, y 偏振方向谐振波长移至通信波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处,对应的 y 偏振方向谐振耦合强度达到了 412.91 dB/cm ;而通信波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处对应的 x 偏振方向损耗仅为 2.02 dB/cm ,从而获得了通信波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处两偏振方向谐振耦合强度比达到 204 的强偏振相关滤波特性的 PCF,其偏振相关耦合强度比远远大于文献[15]所报道的通信波长处仅为 25 左右的谐振耦合强度比,而且文中所提出的光纤具有更简单的端面结构,更适合用于窄带单偏振相关滤波器件的研究.

为了更进一步分析表面等离子模对偏振相关滤波特性的影响,分析了镀膜厚度的改变对两偏振方向纤芯模谐振耦合的影响.在图 4 的基础上改变镀膜厚度为 $0.0195 \mu\text{m}$,由图 5(a)可知,金属镀膜厚度的改变几乎不影响两偏振方向纤芯模式传播常数,而表面等离子模式折射率随着镀膜厚度 t 的减小而增大,因此随着镀膜孔厚度 t 的减小,两偏振方向纤芯模与两偏振方向表面等离子模的相位匹配点移至长波长处.当镀膜厚度为 $0.0195 \mu\text{m}$ 时, y 偏振方向纤芯模与 y 偏振方向 SPPs 模的在通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处产生表面等离子共振效应.由图 5(b)可知,通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, y 偏振纤芯模谐振耦合强度达到 536.25 dB/cm ,相应波长处 x 偏振方向纤芯模式损耗仅为 5.29 dB/cm ,两偏振方向损耗比高达 101;镀膜厚度为 $0.055 \mu\text{m}$ 时谐振波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处 y 偏振方向谐振耦合强度达到了 412.91 dB/cm ,对应的 x 偏振方向损耗仅为 2.02 dB/cm ,两偏振方向损耗比高至 204,与图 4(b)显示结果一致.因此,通过调节镀膜厚度,可获得不同通信波长处的强偏振

相关滤波传输特性.当镀膜厚度分别为 $0.055 \mu\text{m}$ 和 $0.0195 \mu\text{m}$, 对应谐振波长 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 处的 FWHMs 值分别为 21 nm 和 43 nm , 相比仅在纤芯模引入非对称因素时产生的谐振响应 FWHM 值, 在表面等离子模中引入非对称因素能够获得更小的谐振响应 FWHM 值. 可知, 在 PCF 表面等离子模中引入非对称因素能够形成较好的偏振相关滤波传输特性.

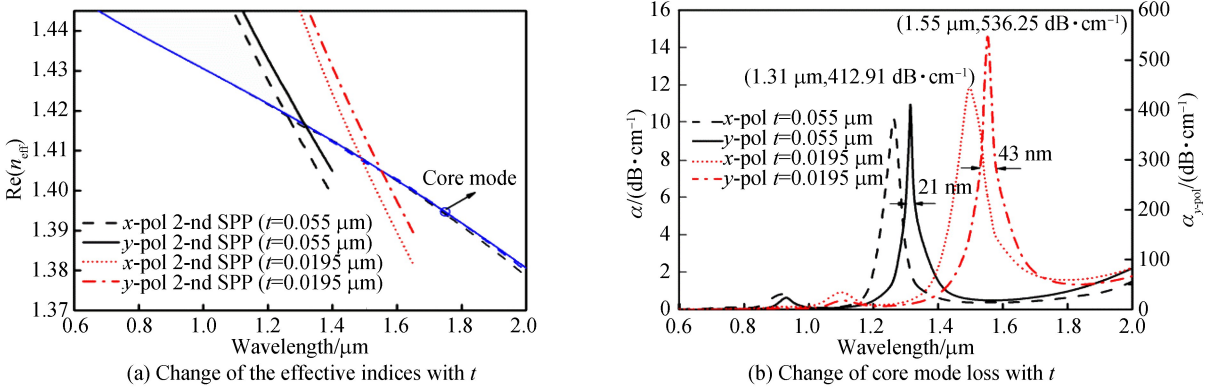


图5 PCF 纤芯模与 SPPs 模谐振模式耦合随镀膜厚度的变化

Fig.5 The resonance coupling between core-guided modes and SPPs modes of the PCF with different coating thickness t

2.3 纤芯模和 SPPs 模同时引入非对称因素的 PCF

图 6 为纤芯模和表面等离子模同时引入非对称因素, 光纤结构参数固定为 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $d_1 = d = 1.4 \mu\text{m}$, $s = 0.4 \mu\text{m}$, $d_c = 0.2 \mu\text{m}$, $t = 0.0213 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.8 \mu\text{m}$ 时两偏振方向纤芯模与 SPPs 模的谐振耦合状态. 由图 6(a) 可知, 当纤芯模和 SPPs 模同时引入非对称因素时, 两种模式在两偏振方向上都有效分开, 并且随着波长增大, 两偏振方向纤芯模式有效折射率差越大, 从而增大了两偏振方向纤芯模谐振波长的距离. 由图可知, x 偏振方向纤芯模谐振波长为 $1.47 \mu\text{m}$, y 偏振方向纤芯模与 y 偏振方向二阶 SPPs 模式在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处正好满足相位匹配. 图 6(b) 显示了 $1.55 \mu\text{m}$ 处 y 偏振纤芯模谐振损耗为 802.08 dB/cm , 相同波长处 x 偏振纤芯模损耗低至 5.57 dB/cm , 两偏振方向损耗比为 144. 谐振波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的谐振响应 FWHM 值仅为 28 nm . 相比图 3(b) 所示的单独在纤芯模引入非对称因素和图 5(b) 所示的单独在 SPPs 模式引入非对称因素所产生的谐振耦合强度, 图 6(b) 显示的在纤芯模和 SPPs 模式中同时引入非对称因素, 可以产生更强的谐振耦合强度, 并且也能获得较低谐振响应 FWHM 值, 为光纤通信波带处强偏振相关滤波特性的偏振相关滤波器件的应用提供了理论设计基础.

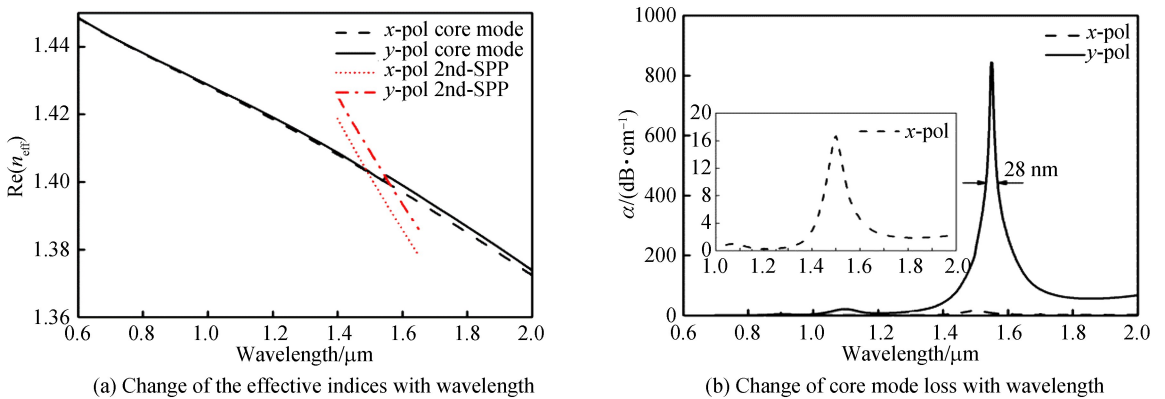


图6 纤芯模和 SPPs 模都引入非对称因素的 PCF 纤芯模与 SPPs 模谐振模式耦合随波长的变化

Fig.6 The resonance coupling between core-guided modes and SPPs modes of the PCF with asymmetric factor introduced both in the core modes and SPPs modes as function of wavelength

图 7 为图 6 所示的金镀膜光纤在谐振响应波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处的基模模场分布图. 从图 7(b) 可知, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 光纤 y 偏振纤芯模式与 y 偏振二阶表面等离子模式具有相同的模式传播常数, 光纤纤芯模式强烈的耦合到金属表面产生的 SPPs 模式中, 产生了表面等离子共振效应, 而图 7(a) 显示的 x 偏振方向光纤基

模场能量被全部限制在纤芯中.光纤的这种特性可以很好地将其应用于通信波段的光纤偏振滤波器中.

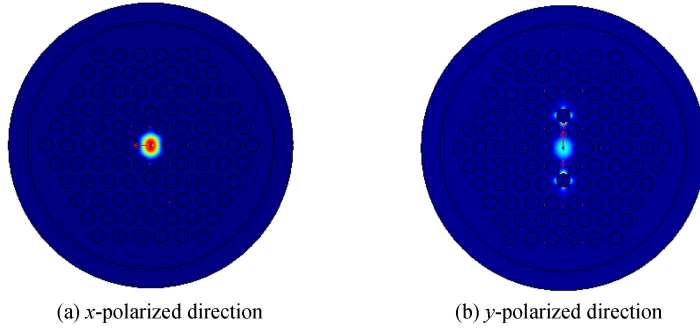


图7 波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处的 PCF 基模场分布

Fig.7 The fundamental mode field distributions of the proposed PCF at $1.55 \mu\text{m}$

2.4 容差性分析

表1详细地分析和比较了PCF1、PCF2、PCF3三类光纤金属镀膜孔位置 s 、镀膜厚度 t 、熊猫大孔 d_2 分别偏离原来 $\pm 1\%$ 时对通信波段PCF谐振耦合强度的影响.对于仅在纤芯模引入非对称因素的PCF1,由于其镀膜厚度为 50 nm ,镀膜厚度细微的改变将对其谐振耦合强度影响小至忽略,而纤芯附近两大孔的改变较大的影响了通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的谐振耦合强度,其谐振耦合强度改变率高达 9.62% .通过前面分析可知,对于仅在纤芯模引入非对称因素的PCF,其偏振相关滤波特性相比其他两类PCF所获得的谐振耦合强度更弱些,因此仅在纤芯模引入非对称因素的PCF偏振相关滤波特性较弱且不允许较大的制作容差.对于PCF2,当镀膜孔越接近纤芯区域增加 $+1\%$ 时, y 偏振方向的谐振耦合强度增大 $+1.89\%$,而当镀膜孔偏离纤芯区域改变 -1% 时,其相应的谐振耦合强度减小了 -1.88% .相比之下,镀膜厚度改变了原来的 $\pm 1\%$ 时,通信波长处的谐振耦合强度改变率绝对值小于 1% ,同样是由于镀膜孔厚度大至 55 nm 时,镀膜厚度细微的改变几乎不影响其谐振耦合强度.PCF3在相同的结构容差条件下,其通信波长的谐振耦合强度改变率会更大,这是由于纤芯模和SPPs模同时引入非对称因素时,对光纤谐振耦合强度影响因素会更多,就会产生更大的改变率,这也是同时引入非对称因素所产生的缺陷.但是,通信波长谐振耦合强度在结构容差性为 $\pm 1\%$ 时,其谐振耦合强度大于 762.02 dB/cm ,同样具有很高的谐振耦合强度.通过结构参数容差性比较分析可知,仅在纤芯模引入非对称因素的PCF1,光纤结构参数的改变对其影响最大,而PCF2和PCF3这两种类型的具有强偏振相关滤波特性的光纤都允许具有较大的制作容差性,因此,在SPPs模引入非对称因素或者两种模式同时引入非对称因素可获得更好的偏振相关滤波特性,更适用于偏振相关滤波器件的应用.相比文献[14~16,23],文中所提出的通信波长处具有强偏振相关滤波特性的PCF2和PCF3具有更强的谐振耦合强度和更高的两偏振方向偏振相关损耗比,因此所提出的强偏振相关滤波特性的PCF更适合用于偏振相关滤波器的研究和应用.

表1 三种类型PCF结构容差性分析

Table 1 The tolerances analysis of three types of PCFs

Structure parameters variation	Resonance loss at $1.55 \mu\text{m}$ (PCF1)	Change rate at $1.55 \mu\text{m}$ (PCF1)	Resonance loss at $1.31 \mu\text{m}$ (PCF2)	Change rate at $1.31 \mu\text{m}$ (PCF2)	Resonance loss at $1.55 \mu\text{m}$ (PCF3)	Change rate at $1.55 \mu\text{m}$ (PCF3)
The original parameter	461.58 dB/cm	0%	412.91 dB/cm	0%	802.08 dB/cm	0%
$\Delta s/s = -1\%$	N/A	N/A	405.11 dB/cm	-1.88%	772.93 dB/cm	-3.62%
$\Delta s/s = +1\%$	N/A	N/A	420.74 dB/cm	$+1.89\%$	762.02 dB/cm	-4.99%
$\Delta t/t = -1\%$	458.08 dB/cm	-0.75%	409.11 dB/cm	-0.91%	768.60 dB/cm	-4.98%
$\Delta t/t = +1\%$	463.72 dB/cm	$+0.46\%$	409.84 dB/cm	-0.71%	784.13 dB/cm	-2.23%
$\Delta d_2/d_2 = -1\%$	504.63 dB/cm	$+9.32\%$	N/A	N/A	777.30 dB/cm	$+3.09\%$
$\Delta d_2/d_2 = +1\%$	417.17 dB/cm	-9.62%	N/A	N/A	828.63 dB/cm	$+3.31\%$

3 结论

本文提出了三种通信波段处具有强偏振相关滤波传输特性的金属镀膜PCF,相比文献报道的偏振相关

滤波特性 PCF,文中全面系统地比较和分析了在 PCF 纤芯模和 SPPs 模分别单独引入或者同时引入非对称因素时的偏振相关滤波传输特性,得到了三种类型的强偏振相关滤波特性 PCF.数值分析比较可知,仅在纤芯模引入非对称因素的 PCF 其偏振相关滤波特性相对较弱,且谐振响应 FWHM 值较大;仅在 SPPs 模中引入非对称因素的 PCF 可以获得通信波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 处两偏振方向损耗比高达 204 的强偏振相关滤波特性,且其 FWHM 值可以低至 $21\ \text{nm}$;两种模式同时引入非对称因素的 PCF 可以获得通信波长处 $1.55\ \mu\text{m}$ 谐振响应高达 $802.08\ \text{dB/cm}$,偏振损耗比为 144 且 FWHM 值仅为 $28\ \text{nm}$ 的强偏振相关滤波传输特性.因此,SPPs 模引入非对称因素是产生 PCF 高偏振相关滤波特性的首要选择,将其所获得的通信波长强偏振相关滤波特性的 PCF 可用于单波带阻滤波器、起偏器等偏振相关滤波器件中,对 PCF 单波带偏振相关滤波器及其相关偏振器件的设计与应用具有一定的参考价值.另外,三种类型的具有偏振相关滤波特效的 PCF 都是最简单的三角阵列排列结构,可以用堆积法完成其光纤的控制,采用涂覆法和化学气相沉积法在微结构光纤微孔中选择性金属镀膜,为光纤的实际制作增加了可能性.

参考文献

- [1] KNIGHT J C. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, **424**(6590): 847-851.
- [2] JIANG Ling-hong, ZHENG Yi, HOU Lan-tian, *et al.* Design of highly birefringent SF57 soft glass PCF with low effective mode area[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2014, **33**(3): 222-226.
- [3] ZHANG Xiao-juan, ZHAO Jian-jin, FANG Liang. Analysis of pulse trapping characteristic in highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 1154-1160.
张晓娟,赵建林,方亮.一种高双折射光子晶体光纤的脉冲俘获分析[J].光子学报,2011,**40**(4):1154-1160.
- [4] HE Zhong-jiao. Rectangular-hole photonic crystal fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 583-586.
何忠蛟.矩形孔光子晶体光纤[J].光子学报,2011,**40**(4):583-586.
- [5] WU C, LI J, FENG X, *et al.* Side-hole photonic crystal fiber with ultrahigh polarimetric pressure sensitivity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(7): 943-948.
- [6] CHEN M Y, SUN B, ZHANG Y K, *et al.* Design of broadband polarization splitter based on partial coupling in square-lattice photonic crystal fiber[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(16): 3042-3048.
- [7] DU Y, QIAO X, RONG Q, *et al.* Polarization-dependent in-line quasi-michelson interferometer based on PM-PCF reflection[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(15): 3591-3596.
- [8] ZHAO Y, SUN B, LIU Y, *et al.* Polarization mode coupling and related effects in fiber bragg grating inscribed in polarization maintaining fiber[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(1): 611-619.
- [9] SHAHABUDDIN N S, AHMAD H, YUSOFF Z, *et al.* Spacing-switchable multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation and brillouin scattering in photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(1): 34-38.
- [10] WARRENSMITH S C, MONRO T M. Exposed core microstructured optical fiber bragg gratings: refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(2): 1480-1489.
- [11] TYAGI H K, LEE H W, SCHMIDT P M A, *et al.* Plasmon resonances on gold nanowires directly drawn in a step-index fiber[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(15): 2573-2575.
- [12] LEE H W, SCHMIDT M A, RUSSELL PS J. Excitation of a nanowire “molecule” in gold-filled photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(14): 2946-2948.
- [13] ZHANG X, WANG R, COX F M, *et al.* Selective coating of holes in microstructured optical fiber and its application to in-fiber absorptive polarizers[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(24): 16270-16278.
- [14] 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.
- [15] XUE J, LI S, XIAO Y, *et al.* Polarization filter characters of the gold-coated and the liquid filled photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(11): 13733-13740.
- [16] DU Y, LI S, LIU S, *et al.* Polarization splitting filter characteristics of Au-filled high-birefringence photonic crystal fiber. *Applied Physics B*, 2012, **109**(1): 65-74.
- [17] NAGAI Y, SHAOCHIEH, KAJIKAWA K. Two-dimensional coherent random laser in photonic crystal fiber with dyedoped nematic liquid crystal[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(32): 8969-8972.
- [18] TYAGI H K, SCHMIDT M A, PRILL SEMPERE L N, *et al.* Optical properties of photonic crystal fiber with integral micron-sized Ge wire[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(22): 17227-17236.
- [19] WANG Zhi-bin, HAN Huan-huan, CHAI Jun-fu, *et al.* Prism surface plasmons resonance sensor based on the porous silicon[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(9): 1152-1158.
王志斌,韩欢欢,柴君夫,等.基于多孔硅的表面等离子共振传感特性[J].发光学报,2016,**37**(9):1152-1158.
- [20] RIFAT A A, MAHDIRAJI G A, SUA Y M, *et al.* Highly sensitive multi-core flat fiber surface plasmon resonance refractive index sensor[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(3): 2485-2495.

- [21] KHALEQUEA, HATTORI H T. Polarizer based upon a plasmonic resonant thin layer on a squeezed photonic crystal fiber[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(9): 2543-2549.
- [22] LI M, PENG L, ZHOU G Y, *et al.* Design of photonic crystal fiber filter with narrow width and single-polarization based on surface plasmon resonance[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(3): 5700108.
- [23] LIAO C, ZHANG F, HE J, *et al.* Surface plasmon resonance biosensor based on gold-coated side-polished hexagonal structure photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(17): 20313-20322.
- [24] CHEN H L, LI S G, FAN Z K, *et al.* A novel polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with a liquid crystal modulation core[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(4): 2201109.
- [25] WIEDERHECKER G S, CORDEIRO C M B, COUNY F, *et al.* Field enhancement within an optical fibre with a subwavelength air core[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 115-118.

Foundation item: The Natural Science Foundation of China(No.61735011), the Natural Science Foundation of Hebei Province (Nos. F2018105036, F2018203346), Colleges and Universities in Hebei Province Science and Technology Research Project(No.BJ2017108), Science and Technology Planning Project of Tangshan City(No.17130254a), PhD Innovation Fund Project of Tangshan University, and Tangshan Key Laboratory of Indoor Location Technology.

引用格式:JIANG Ling-hong, WANG Chao, HAN Ying, *et al.* Effect of the Asymmetric Factor on the Polarization-dependent Filter of Photonic Crystal Fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1206002

姜凌红,王超,韩颖,等.非对称性对光子晶体光纤偏振相关滤波特性的影响[J].光子学报,2018,**47**(12):1206002