

文章编号: 1001-3806(2016)01-0001-04

一种金填充高双折射光子晶体光纤偏振滤波器

甄海龙

(大同大学 物理与电子科学学院, 大同 037009)

摘要: 为了获得具有对称性结构的金填充高双折射光子晶体光纤, 采用有限元方法对光纤的纤芯基模、金属表面等离子体激元的色散和损耗特性进行了分析。改变包层晶格节距、纤芯周围气孔直径以及填充金丝直径能够灵活地调节纤芯基模与等离子体激元之间共振响应波长点的位置和耦合强度。通过对光纤结构参量的优化, 获得了一种基于通信波段的偏振滤波器。当特定空气孔数值孔径确定后, 在 $1.55\mu\text{m}$ 处, x 方向基模损耗可以达到 473dB/cm , 而 y 方向基模几乎不会受到等离子体激元的干扰。结果表明, 与单偏振单模光子晶体光纤相比, 新设计的光纤结构可以通过调节金丝直径大小, 选择性地滤掉某一偏振方向的光, 从而达到在通信波段滤波的效果。该研究对研制基于通信波段的偏振滤波器具有一定的参考意义。

关键词: 光纤光学; 偏振滤波器; 有限元法; 表面等离子体共振; 双折射

中图分类号: TN253; O436.2

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.001

Polarization filters based on high birefringence photonic crystal fiber filled with Au

ZHEN Hailong

(Department of Physics and Electronics, Datong University, Datong 037009, China)

Abstract: In order to obtain symmetrical high birefringence photonic crystal fiber filled with Au. The fundamental mode of the fiber core, dispersion and loss characteristics of plasma polaritons of metal surface were analyzed by means of finite element method. The resonance positions and the resonance strength between fundamental mode and plasma polaritons could be well adjusted by changing the distances between the cladding air holes, the diameters of air holes around the core and the diameter of metal wire. By optimizing the parameters of fiber structure, a polarization filter at the communication band was designed. After numerical aperture of air hole was determined, fundamental mode loss in x -position could reach 473dB/cm and fundamental mode loss of y -position was almost not affected by surface plasma polariton (SPP) mode at the wavelength of $1.55\mu\text{m}$. The results show that compared with ordinary single-polarization and single-mode photonic crystal fibers, the polarized light in one direction can be filtered out selectively by adjusting the wire diameter and achieve filtering effect in the communication band. It is meaningful for the development of polarization filter in the communication band.

Key words: fiber optics; polarization filter; finite element method; surface plasma resonance; birefringence

引言

实现光子器件的小型化、集成化是光纤器件的一种发展趋势。近几年来, 光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 更以灵活可控的特性在光纤及器件的设计应用中得到广泛发展。通过向光纤的纤芯或包层空气孔中填充液体^[1-2]、液晶^[3-4]、半导体^[5]或金属^[6-10]等来改变光纤特性, 从而丰富 PCF 在光学领域当中的应用。目前应用主要集中在高灵敏度传感^[11]、偏振相关的非线性^[12]以及太赫兹波段光传输^[13]等领域。

在 PCF 中填充金属, 利用金属与介质界面之间产

生的表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 效应实现一些新的功能器件, 尤其在有关偏振特性的研究上取得巨大进展。2008年, LEE 等学者^[14]对表面等离子体激元共振耦合特性从理论和实验角度进行了研究, 他们设计的光纤器件长度为 24.5mm, 且消光比大于 45dB。2011年, NAGASAKI 等人^[15]对金填充 PCF 偏振耦合特性进行了理论研究, 并发现存在强烈的耦合特性。通过在包层空气孔中选择性的填充一根或多根金线, 可以获得大的偏振消光比。利用金属表面等离子体 (surface plasmon polariton, SPP) 激元与纤芯基模模式产生 SPR 效应, 增大共振点处的损耗值, 从而实现良好的滤波功能。2013 年, LI 等人对双芯金属填充型 PCF 的色散和偏振特性做了进一步研究^[16]。对于高双折射光子晶体光纤 (high birefringence photonic crystal fiber, HB-PCF) 的研究主要集中在两个方面:

作者简介: 甄海龙 (1983-), 男, 助教, 主要从事光子晶体光纤非线性方面的研究。

E-mail: zhenhailong102030@126.com

收稿日期: 2014-12-19; 收到修改稿日期: 2015-03-13

一方面是基于单模单偏振滤波的研究^[17];另一方面是基于金属填充偏振选择滤波器的设计与研究^[18-19]。单模单偏振的 PCF 滤波器只能滤掉某一偏振方向的光,而金填充 PCF 偏振滤波器可以有选择性地滤掉某一偏振方向的光,有利于对光纤中偏振模式进行优化选择。

本文中设计了一种具有在相互垂直方向上相互称性结构的金填充 HB-PCF, 利用有限元法 (finite element method, FEM) 进行数值模拟, 并对影响光纤偏振滤波效应的因素进行分析, 通过结构优化最后获得一种在通信波段处具有选择性偏振滤波特性的光子晶体光纤滤波器。

1 结构设计及理论基础

本文中设计的 HB-PCF 端面结构如图 1 所示, 光纤包层孔为矩形晶格结构, 相邻孔间距 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, 其中心位置去掉一个孔形成纤芯。为了增强光纤双折射度, 设计了由内而外直径逐渐增加的包层空气孔, 其中纤芯附近 x 轴方向两个大空气孔直径为 $d_1 = 2.0 \mu\text{m}$, y 方向 4 个空气孔直径为 $d_2 = 2.4 \mu\text{m}$, 并且在纤芯两侧 y 轴方向对称位置填充直径为 $d_3 = 1.0 \mu\text{m}$ 的金丝(深色部分), 其余空气孔直径如图 1 所示, 在 x 方向左右对称逐渐增大, 依次为 $0.6 \mu\text{m}, 1.2 \mu\text{m}, 1.4 \mu\text{m}, 1.6 \mu\text{m}$ 和 $1.8 \mu\text{m}$; 在 y 方向两层小空气孔直径依次递减为 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $0.6 \mu\text{m}$ 。如此设计的目的在于更大限度地增加光纤双折射度。图中 x_p 和 y_p 分别表示 x 偏振方向和 y 偏振方向。

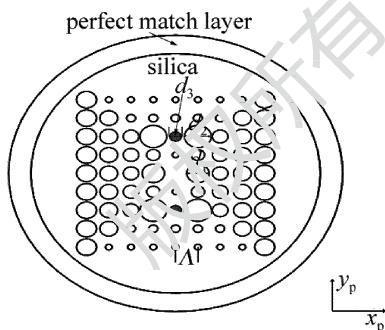


Fig. 1 Cross-section view of HB-PCF filled with Au

数值模拟过程中考虑了石英和金属的材料色散, 利用 Sellmeier 方程对石英折射率进行计算:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \lambda_j^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \quad (1)$$

式中, λ 为波长, 单位是 μm , $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$; B_j 为 Sellmeier 系数, 无单位, $B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$ 。金的介电常数由 Drude-Lorentz 模型定义^[20]:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_d^2}{\omega(\omega + i\gamma_d)} - \frac{\Delta\varepsilon\Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) + i\Gamma_L\omega} \quad (2)$$

式中, 高频介电常数 $\varepsilon_\infty = 5.9673$, 加权系数 $\Delta\varepsilon = 1.09$, ω 为被引导光的角频率, 等离子体频率 $\omega_d/(2\pi) = 2113.6 \text{ THz}$, 阻尼频率 $\gamma_d/(2\pi) = 15.92 \text{ THz}$, 洛伦兹振荡器的振子强度 $\Omega_L/(2\pi) = 650.07 \text{ THz}$, 洛伦兹振荡器的频谱宽度 $\Gamma_L/(2\pi) = 104.86 \text{ THz}$ 。光纤的模场限制损耗定义为:

$$L = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4 \quad (3)$$

式中, 模场限制损耗单位为 dB/cm , $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率虚部。

2 模拟结果与分析

2.1 色散关系与双折射度

图 2 为金填充 HB-PCF 色散关系曲线。从图中可以看出, 在光通信波段 ($1.55 \mu\text{m}$ 附近) 处金属表面等离子体激元 1 阶 SPP 模式的有效折射率与纤芯模式有效折射率有交叉点, 在交叉点对应的波长处可以产生 SPR 效应。而在 $1000 \text{ nm} \sim 1200 \text{ nm}$ 波段处两偏振方向上的 2 阶金属 SPP 模式与纤芯基模在不同的波长点处发生 SPR 效应, 但共振强度相比于 1 阶模式减弱。为实现选择性偏振滤波效应提供了可能。而倾斜的两条直线为纤芯基模的有效折射率。从图中可以看到, x 和 y 方向的有效折射率直线差值很大, 由公式 $B = |\text{Re}(n_{x,\text{eff}} - n_{y,\text{eff}})|$ (B 为基模的模式双折射度, $n_{x,\text{eff}}$, $n_{y,\text{eff}}$ 分别为 x 和 y 偏振方向上基模的有效折射率) 可知, 在需要的通信波段, 该光纤的双折射很大, 这主要是由于作者所设计的结构中光纤的高度对称性被打破所致, 这样做的目的在于可以更好地激发某一方向的 SPR 效应, 而尽量减少对另一方向光纤基模的损耗。

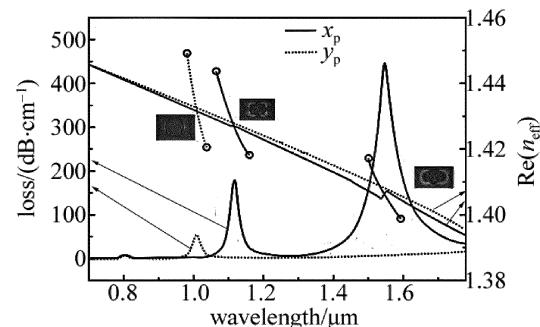
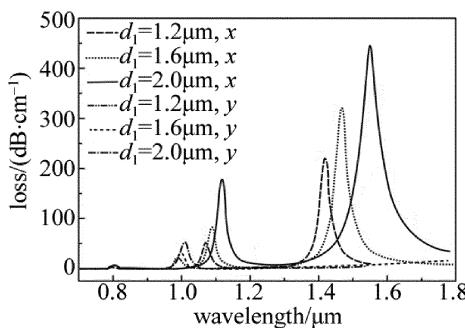


Fig. 2 Dispersion and wavelength of HB-PCF filled with Au

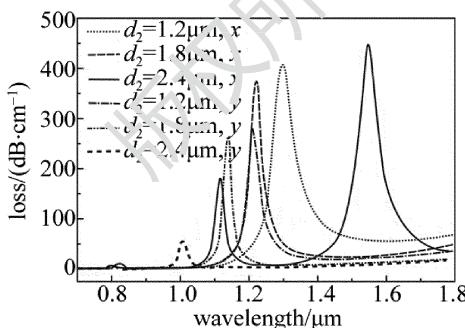
2.2 孔径参量对光纤 SPR 效应的影响

2.2.1 d_1 对光纤传输损耗的影响 图 3 所示为空气孔直径 d_1 改变时对光纤传输损耗的影响。将空气孔 d_1 直径从 $1.2 \mu\text{m}$ 均匀增加到 $2.0 \mu\text{m}$, 此时其它参量与图 1 所示一致。图中不同线型分别代表基模 x 与 y

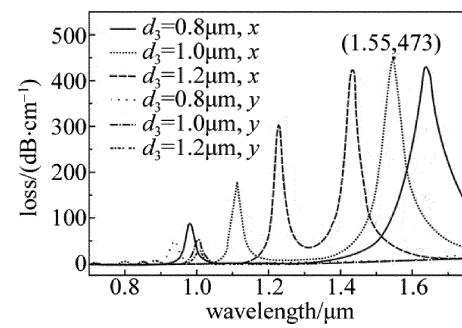
Fig. 3 Loss curve and wavelength d_1 of HB-PCF

方向偏振模的损耗曲线,可以看到,随着空气孔直径 d_1 的增加, x 方向损耗曲线出现蓝移现象,而且随着 d_1 的增加, SPR 现象显著提高,耦合效应明显增强,即损耗峰值在不断提高。然而更可以发现,另一垂直 y 方向的基模损耗几乎不受 d_1 影响。这一性质可以帮助滤掉特定波长特定方向的基模。值得注意的是,当 $d_1 = 2.0 \mu\text{m}$ 时, x 方向损耗峰处于通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近且损耗值达到最大,因此选择 d_1 的数值大小为 $2.0 \mu\text{m}$ 。

2.2.2 d_2 对光纤传输损耗的影响 图 4 所示为随着填充金属丝周围 4 个空气孔直径 d_2 的变化光纤传输损耗的变化情况,其它孔径参量与图 1 所示一致。数值模拟过程中发现,改变金属丝周围空气孔的直径大小对光纤基模损耗变化的影响很大。随着 d_2 从 $1.2 \mu\text{m}$ 变化到 $2.4 \mu\text{m}$, x 方向的损耗曲线向长波方向移动,且当 $d_2 = 2.4 \mu\text{m}$ 时,损耗曲线出现两个峰值,类似于图 2 所示,这是由金属的 SPP 模式中的 1 阶模和 2 阶模同时与纤芯基模发生耦合所致。此时在所想要的波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近,光纤损耗达到最大,因此选择 $d_2 = 2.4 \mu\text{m}$ 。

Fig. 4 Loss curve and wavelength d_2 of HB-PCF

2.2.3 d_3 对光纤传输损耗的影响 图 5 所示为随着金属丝直径 d_3 变化时光纤传输损耗的变化情况,此时其它参量与图 1 所示一致。从图中可以看出,当金属丝直径从 $0.8 \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $1.2 \mu\text{m}$ 时, x 方向损耗曲线的两个损耗峰分别由两端向中间移动,令人惊喜的是,当金属丝直径 $d_3 = 1.0 \mu\text{m}$ 时, x 方向的损耗峰恰好移动到 $1.55 \mu\text{m}$ 处,且峰值达到了 473dB/cm ,而另一

Fig. 5 Loss curve and wavelength d_3 of HB-PCF

方向的基模并没有受到 SPR 效应的影响。如此,作者所设计的结构可以在通信波段 $1.55 \mu\text{m}$ 处达到很好的偏振滤波效果。如图 1 所示的结构有望应用于通信波段处的光纤分束滤波器中。

3 结 论

设计了一种金填元 HB-PCF,通过调节结构参量和金属丝的直径大小来实现通信波段处的分束滤波功能。在同一结构中同时观察到了金属不同阶 SPP 模式与纤芯基模同时发生耦合的情况。当 $d_1 = 2.0 \mu\text{m}$, $d_2 = 2.4 \mu\text{m}$,且 $d_3 = 1.0 \mu\text{m}$ 时,在 $1.55 \mu\text{m}$ 处 x 方向的损耗峰值达到 473dB/cm ,可实现在通信波段的偏振滤波效果。这对光子晶体光纤在偏振滤波器的设计与应用方面有重要的研究意义。

参 考 文 献

- [1] QIN W, LI Sh G, XUE J R, et al. Numerical analysis of a photonic crystal fiber based on two polarized modes for biosensing applications [J]. Chinese Physics, 2013, B22(7): 074213.
- [2] SHUAI B, XIA L, ZHANG Y, et al. A multi-core holey fiber based plasmonic sensor with large detection range and high linearity [J]. Optics Express, 2012, 20(6): 5974-5986.
- [3] WANG D D, WANG L L, LI D D. Design and analysis of thermally tunable liquid-crystal-filled microstructured polymer optical fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 559-564 (in Chinese).
- [4] HAO M M, QIN L, ZHU H B, et al. High power 976nm fiber coupled module based on diode laser short bars [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 895-903 (in Chinese).
- [5] GUO X, BI W H, LIU F. The refractive index sensing characteristics of polarization maintaining microstructured optical fiber chirped grating [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(1): 266-270 (in Chinese).
- [6] JIANG Y X, LIU B H, ZHU X S, et al. Study of silver coated hollow-core fiber surface plasmon resonance sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 243-249 (in Chinese).
- [7] ZHOU P, WANG X, MA Y, et al. Review on recent progress on mid-infrared fiber lasers [J]. Laser Physics, 2012, 22(11): 1744-1751.
- [8] HAN Y, XIA L, LIU D M. Highly sensitive fiber refractive index sensor based on side-core holey structure [J]. Chinese Physics, 2014, B23(10): 104219.
- [9] HAN Y, HOU L T, XIA Ch M, et al. Investigation on the fabrication and luminescence characteristics of Yb^{3+} and Al^{3+} co-doped silicate glasses [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5): 054212 (in Chinese).

[10] ZHANG Sh Y, YU X, ZHANG Y, *et al*. Theoretical study of dual-core photonics crystal fibers with metal wire [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(4):1178-1187.

[11] KIM H M, KIM T H, KIM B Y, *et al*. Enhanced transverse load sensitivity by using a highly birefringent photonic crystal fiber with larger air holes on one axis [J]. Applied Optics, 2010, 49(20): 3841-3845.

[12] WANG M J, JIA W G, ZHANG S Y, *et al*. Influence of Raman effect on the state of polarization evolution in a low-birefringence fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10):141-146 (in Chinese).

[13] ZHANG X F, YAN X. Tunable plasmonic properties of gold hollow-core semi-shell nanofilms [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2):196-199 (in Chinese).

[14] 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): 111102 .

[15] NAGASAKI A, SAITO 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.

[16] LI P, ZHAO J L. Polarization-dependent coupling in gold-filled dual-core photonic crystal fibers [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5232-5238.

[17] ZHENG H J, WU Ch Q, WANG J, *et al*. A novel single-polarization single-mode photonic crystal fiber with two arrays of four lines of semiminor-axis-decreasing elliptical air-holes [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8):43-49 (in Chinese).

[18] LI J H, WANG R, WANG J Y, *et al*. A novel wavelength-division demultiplexer based on selectively liquid-filled photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2011, 28(4):507-512 (in Chinese).

[19] CAO Y, CUI D N, TONG Zh R, *et al*. Dual-core photonic crystal fiber polarization splitter based on tellurite glass [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6):0605007 (in Chinese).

[20] VIAL A, GRIMAUT A S, MACIAS D, *et al*. Improved analytical fit of gold dispersion: application to the modeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method [J]. Physical Review, 2005, B71(8):085415.

· 简讯 ·

《激光技术》荣获国家 A 类学术期刊认定

为严格学术期刊出版资质,优化学术期刊出版环境,促进学术期刊健康发展,根据国家新闻出版广电总局《关于规范学术期刊出版秩序 促进学术期刊健康发展的通知》、《关于开展学术期刊认定及清理工作的通知》,总局组织开展了学术期刊认定工作,并于 2015 年 2 月 1 日公示。《激光技术》成为国家首批认定的 A 类学术期刊之一。这是对《激光技术》办刊宗旨与期刊质量的肯定。

《激光技术》编辑部