

# 金涂覆光子晶体光纤偏振滤波器的特性分析

闫欣, 王海洋  
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 设计了一种基于表面等离子体共振的光子晶体光纤偏振滤波器. 在空气孔中选择性金涂覆使表面等离子体模式与纤芯模式共振. 利用有限元法分析了改变结构参数对滤波器性能的影响. 数值模拟结果表明金薄膜厚度和空气孔直径能够优化表面等离子体模式及纤芯模式的共振峰位置和强度, 在波长  $1.31\text{ }\mu\text{m}$  处  $x$  偏振方向的损耗到达  $740.5\text{ dB/cm}$ ,  $y$  偏振方向的损耗很低且  $x, y$  方向的损耗峰明显地被分开. 利用这些特性设计出一种新型的工作在通信波段的光子晶体光纤偏振滤波器.

**关 键 词:** 光子晶体光纤; 表面等离子体共振; 偏振滤波器; 损耗峰; 金涂覆

中图分类号: TN 253      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2018)11-1540-05

## Characteristic Analysis of Gold-Coated Photonic Crystal Fiber Polarization Filter

YAN Xin, WANG Hai-yang  
(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YAN Xin, E-mail: yanxin@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** A photonic crystal fiber polarization filter based on surface plasmon resonance is proposed and investigated. The gold is coated into the selected air holes in order to make surface plasmon modes and core modes resonate. The finite element method is used to analyze the effect on the filter performance by changing the parameters. Numerical simulation results show that the positions of resonance peaks and the resonance strength of core mode and surface plasmon mode can be well adjusted by changing the thickness of gold film and diameter of air holes. The confinement loss in  $x$ -polarization can reach to  $740.5\text{ dB/cm}$  at  $1.31\text{ }\mu\text{m}$ , the confinement loss in  $y$ -polarization is very low, and the loss peaks in  $x$ -polarization and  $y$ -polarization are separated by a large distance. Then a novel kind of photonic crystal fiber polarization filter working at the communication wavelength is designed.

**Key words:** photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; polarization filter; loss peak; gold-coated

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF), 也称微结构光纤 (micro-structured fiber, MSF) 或者多孔光纤 (holey fiber, HF). 光子晶体光纤包层由周期性排列的空气孔组成. 利用光子晶体光纤结构可调性使其表现出很多传统光纤不具有的优异的光学特性, 如无截止单模、低损耗、高非线性效应、高双折射、可控色散、大模场面积等<sup>[1-4]</sup>. 近年来, 往光子晶体光纤中涂覆介质受到越来越多的关注, 例如酒精、煤油、金属等<sup>[5-7]</sup>. 表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 是在光子晶体光纤中涂覆金属体现了全新特性, 当表面等离子体模式与纤芯模式满足匹配条件时在金属表面产生等离子体共振.

近年来, 在金属和光纤与介质界面产生的表面等离子体被广泛应用于传感器、偏振滤波器、偏振分束器<sup>[8-10]</sup>. 2015 年 Luan 等提出了一种基于表面等离子体共振 D 形光子晶体光纤传感器并且得到了较高的灵敏度<sup>[11]</sup>. 2014 年, An 等设计

了一种基于金涂覆的高双折射光子晶体光纤偏振滤波器,其在通信波段 1 550 nm 处的共振强度达到了 407 dB/cm<sup>[12]</sup>. 利用表面等离子体模式与纤芯模式产生表面等离子体效应,使在匹配波长处的损耗值激增实现滤波的功能.

本文设计了一种基于金涂覆的八边形光子晶体光纤偏振滤波器并使用有限元法计算其滤波特性. 数值模拟分析结果显示了改变涂覆金的圆直径和金膜厚度,损耗峰位置会改变,并且在通信波段 1.31 μm 处 y 偏振方向的共振强度很大,x 偏振方向的共振强度很小.

## 1 结构设计和色散关系

### 1.1 结构设计及理论基础

金涂覆的八边形光子晶体光纤偏振滤波器端面结构如图 1 所示. 金涂覆层的厚度 Δ = 60 nm, 在其界面处产生表面等离子体共振. 在垂直方向上的空气孔直径 d<sub>1</sub> = 2.2 μm, d<sub>2</sub> = 0.6 μm. 其余的空气孔大小为 d<sub>3</sub> = 1.2 μm. 相邻两个空气孔之间的距离 Λ = 2.0 μm. 为了增强耦合性能, d<sub>1</sub> 和 d<sub>2</sub> 向纤芯方向移动 0.3 μm. 设定完美匹配层 (perfectly matched layer, PML) 和散射边界条件减少能量损耗.

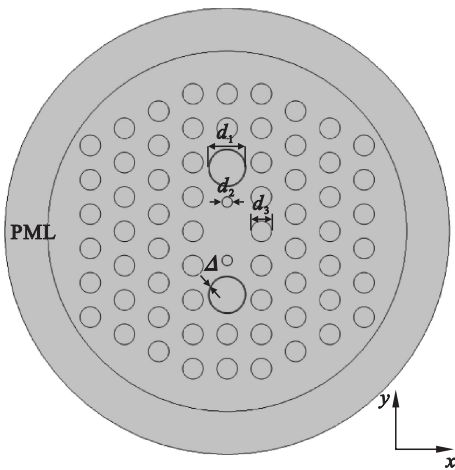


图 1 光子晶体光纤偏振分束器截面图  
Fig. 1 Cross section of the PCF polarization filter

背景材料是石英玻璃,色散关系可以由 Sellmeier 公式得到. 金的介电常数可以由 Drude - Lorentz 表示<sup>[13]</sup>:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\varepsilon \cdot \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) - jI\omega_L} \quad (1)$$

式中:高频介电常数  $\varepsilon_\infty = 5.967$ ;加权系数  $\Delta\varepsilon = 1.09$ ;  $\omega$  为被引导光的角频率;等离子体频率  $\omega_D/2\pi = 2\,113.6\text{ THz}$ ;阻尼频率  $\gamma_D/2\pi =$

15.92 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  $\Gamma_L/2\pi = 104.86\text{ THz}$ .

光纤的限制损耗定义为

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

式中,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  是有效折射率的虚部;损耗和波长的单位分别是 dB/cm 和 μm.

### 1.2 色散关系与耦合方式

图 2 是设计光纤的色散关系曲线. 从图中可以得到,在 1.31 μm 处 x 偏振方向的二阶等离子体模式与纤芯模式发生表面等离子体效应,使得 x 偏振方向的损耗明显变大. 在 1.09 μm 处 y 偏振方向的三阶等离子体模式与纤芯模式也发生表面等离子体共振,使 y 偏振方向的损耗变大. 二阶等离子体模式与纤芯的耦合明显强于三阶等离子体模式与纤芯的耦合. 主要是因为二阶等离子体模式与纤芯模式发生完全耦合,而三阶等离子体模式与纤芯发生不完全耦合.

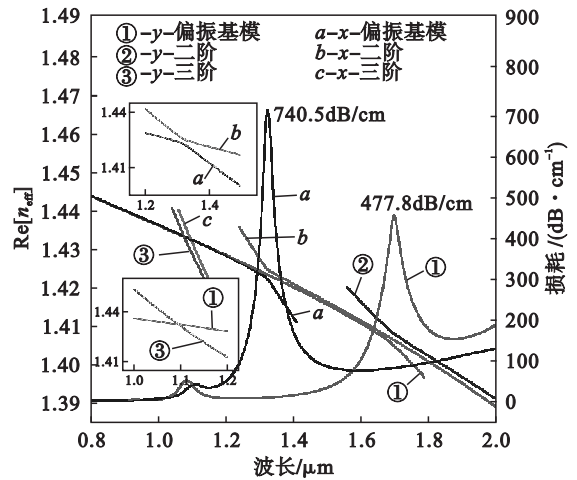


图 2 纤芯模式和 SPP 模式色散关系  
Fig. 2 Dispersion relations of the core mode and SPP mode

图 3 为纤芯模式和表面等离子体模式分别在波长为 1.09 μm 和 1.31 μm 处 y, x 偏振方向的模场分布. 从图中可以很明显地看出,在 1.09 μm 处 y 偏振方向纤芯模式能量不完全耦合到金层上,并且三阶等离子体模式与纤芯模式耦合. 而在 1.31 μm 处 x 偏振方向纤芯模式能量完全耦合到金层上,并且二阶等离子体模式与纤芯模式耦合.

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 金层厚度对光纤损耗的影响

图 4 为金层的厚度从 50 nm 变化到 70 nm 时

对光纤损耗的影响. 光子晶体光纤其他参数设定为: $d_1 = 2.2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $d_2 = 0.6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $d_3 = 1.2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 2.0\text{ }\mu\text{m}$ . 图中实线和虚线分别代表  $x$  与  $y$  偏振方向的损耗曲线. 从图中可以得到,随着金层厚度的增加,两个偏振方向损耗峰所在的波长蓝移. 并且随着  $\Delta$  的增加, SPP 模式与纤芯模式的耦合效应明显减弱, 损耗值不断减小. 然而当  $x$  偏振方向发生等离子体共振时  $y$  偏振方向的损耗一直平坦, 几乎不受  $\Delta$  的变化影响. 这样就可以滤掉  $x$  偏振方向的光, 而保留  $y$  偏振方向的光. 可以得到在  $y$  偏振方向存在两个损耗峰, 这是因为 SPP 模式的二阶模态与三阶模态和纤芯模态分别发生完全耦合和不完全耦合. 当  $\Delta = 60\text{ nm}$  时,  $x$  偏振方向发生的完全耦合的损耗峰到达  $1.31\text{ }\mu\text{m}$  通信波段处.

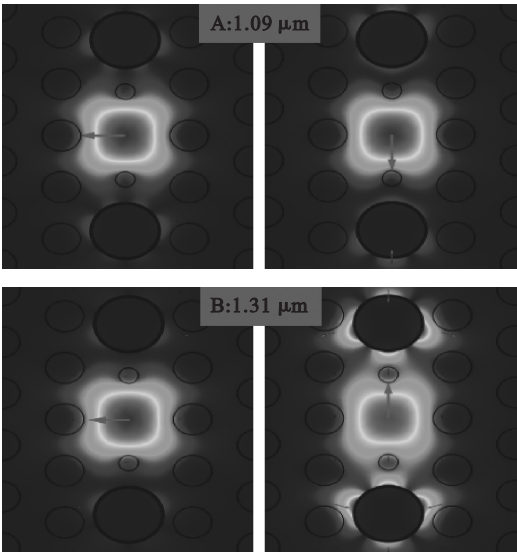


图 3  $y$  偏振方向和  $x$  偏振方向在  $1.09\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.31\text{ }\mu\text{m}$  基模分布  
Fig. 3 Mode distribution in  $y$ -polarized and  $x$ -polarized directions at the wavelength of  $1.09\text{ }\mu\text{m}$  and  $1.31\text{ }\mu\text{m}$

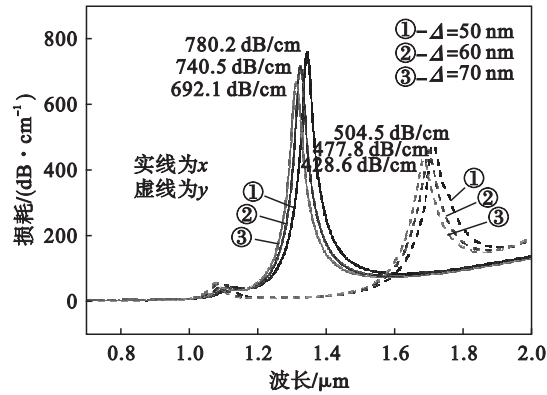


图 4 损耗随金层变化  
Fig. 4 Variation of the loss with the thickness of the gold layer

2.2 涂覆金圆空气孔直径对光纤损耗的影响

图 5 为涂覆金圆空气孔直径变化对光纤传输损耗的影响. 涂覆金圆空气孔  $d_1$  从  $2.0\text{ }\mu\text{m}$  增加到  $2.4\text{ }\mu\text{m}$ . 其他参数设定为  $\Delta = 60\text{ nm}$ ,  $d_2 = 0.6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $d_3 = 1.2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 2.0\text{ }\mu\text{m}$ . 随着  $d_1$  的增加,  $x$  偏振方向的损耗所在波长蓝移, 而  $y$  偏振方向的损耗所在波长红移, 两个偏振方向损耗峰间距随  $d_1$  增加而增大. 而损耗峰间距越大则滤波特性越好, 可以得到  $d_1$  决定了光子晶体光纤偏振滤波器特性. 当  $d_1 = 2.2\text{ }\mu\text{m}$  时  $x$  偏振方向损耗在  $1.31\text{ }\mu\text{m}$  通信波段处到达最大值  $740.5\text{ dB/cm}$ .

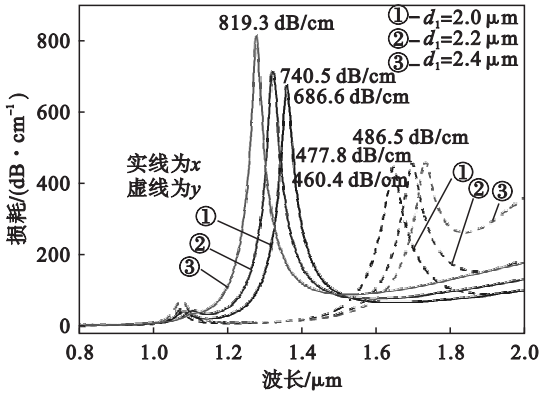


图 5 损耗随金涂覆空气孔变化  
Fig. 5 Variation of the loss with the gold-coated air holes

2.3 串扰

串扰是所提出工作在特定波长下的偏振滤波器的一个重要参数. 用带宽去分析所设计的工作在通信波段偏振滤波器性能. 定义带宽范围是低于  $-20\text{ dB}$  或者高于  $20\text{ dB}$ . 串扰公式定义为

$$CT = 20\lg\{\exp[(\alpha_2 - \alpha_1)L]\} \quad (3)$$

式中:  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  表示  $x$  偏振方向和  $y$  偏振方向的限制损耗;  $L$  表示光纤长度. 本文所设计的光子晶体光纤偏振滤波器 CT 如图 6 所示. 随着光纤长度从  $200\text{ }\mu\text{m}$  增加到  $500\text{ }\mu\text{m}$ , 在波长  $1.31\text{ }\mu\text{m}$  处 CT 的峰值从  $128\text{ dB}$  增加到了  $306\text{ dB}$ . 当光纤长度为  $200\text{ }\mu\text{m}$  时, 最小的带宽 (BW) 为  $145\text{ nm}$ .

2.4 涂覆金圆数量对光纤损耗的影响

图 7a 为一个涂覆金圆的 PCF 滤波器模场截面图. 光子晶体光纤其他参数不变, 金层厚度  $\Delta = 60\text{ nm}$ , 空气孔直径  $d_1 = 2.2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $d_2 = 0.6\text{ }\mu\text{m}$ , 孔间距  $\Lambda = 2.0\text{ }\mu\text{m}$ . 图 7b 为一个涂覆金圆和两个对称涂覆金圆对偏振滤波器 CT 和 BW 的影响. 从图 7 可以得到, 相同光纤长度两个金涂覆圆的 CT 和 BW 都大于仅有一个金涂覆圆的情况. 也就是说两个金涂覆空气孔的纤芯模式与等离子体模式共振耦合强度更大. 两个金涂覆空气孔能更好地

滤掉  $x$  偏振方向的光,所以选择两个金涂覆空气孔偏振滤波器结构.

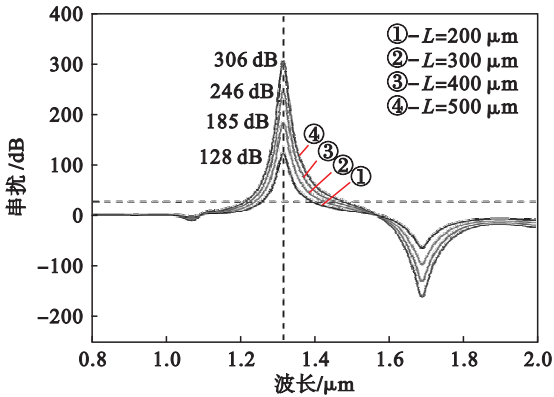


图 6 光纤长度从 200  $\mu\text{m}$  增加到 500  $\mu\text{m}$  时光子晶体光纤偏振分束器的 CT  
Fig. 6 CT of the proposed PCF polarization filter as the length of the fiber increases from 200  $\mu\text{m}$  to 500  $\mu\text{m}$

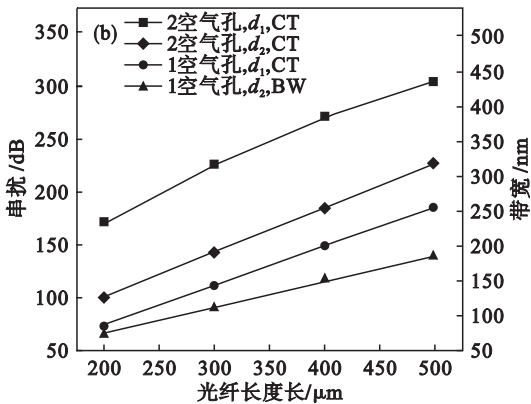
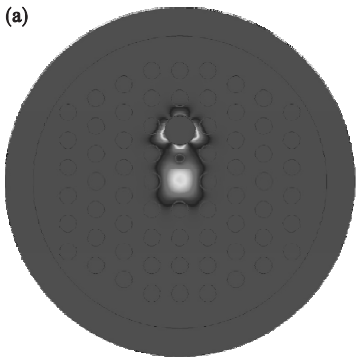


图 7 随光纤长度增加,在 1.31  $\mu\text{m}$  波长处涂覆不同数量金薄膜时串扰和带宽的变化  
Fig. 7 Variation of the crosstalk and bandwidth as the fiber length increases at the wavelengths of 1.31  $\mu\text{m}$  when coated with different amount gold films

(a)—PCF 模场截面;(b)—金圆孔对偏振滤波器的影响.

表 1 对比了本文设计的偏振滤波器与以前文献的偏振滤波器性能<sup>[14-17]</sup>.从表 1 中可以看出在相同的共振波长 1.31  $\mu\text{m}$  处,本文设计的偏振滤

波器性能是最好的.基于以上分析本文设计的偏振滤波器设计结构简单,共振强度高达 740.5 dB/cm 和带宽达到了 324 nm.这使得本文设计的偏振滤波器比其他提出的滤波器更有潜在的应用前景.

表 1 性能对比表			
Table 1 Comparison results of performance			
耦合强度/(dB·cm <sup>-1</sup> )	消光比/dB	带宽/nm	参考文献
103.0	90	40	[14]
123.5	41	58	[15]
231.6	240	60	[16]
475.0	396	181	[17]
740.5	306	324	本文

### 3 结 论

1) 二阶等离子体模式和三阶等离子体模式与纤芯模式所在波长处相位匹配,发生完全耦合和不完全耦合.

2) 金层厚度为 60 nm,涂覆金圆空气孔直径为 2.2  $\mu\text{m}$ ,在通信波段 1.31  $\mu\text{m}$  处  $x$  偏振方向的损耗达到 740.5 dB/cm,但  $y$  偏振方向损耗很小,从而实现滤掉  $x$  偏振方向光.

### 参考文献:

[1] Brikes T A, Knight J C, Russell P S J, et al. Endlessly single mode photonic crystal fiber [J]. *Optics Letter*, 1997, 22 (13): 961-963.

[2] Roberts P, Couny F, Sabert H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.

[3] Wang Z, Liu Y, Kai G, et al. Directional couplers operated by resonant coupling in all-solid photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(14): 8925-8930.

[4] Liao M, Yan X, Qin G, et al. A highly non-linear tellurite microstructure fiber with multi-ring holes for supercontinuum generation [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (18): 15481-15490.

[5] Yu Y, Li X, Hong X, et al. Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling [J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15383.

[6] Jensen J, Hoiby P, Emilianov G, et al. Selective detection of antibodies in microstructured polymer optical fibers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(15): 5883-5889.

[7] 甄海龙. 一种金填充高双折射光子晶体光纤偏振滤波器 [J]. *激光技术*, 2016, 40(1): 1-4.

(Zhen Hai-long. Polarization filters based on high birefringence photonic crystal fiber filled with Au [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(1): 1-4.)

[8] Wang H, Yan X, Li S, et al. Design of the polarization filter based on photonic crystal fiber with Au-coated air holes [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(11): 512-521.

- [9] 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.
- [10] Wang H, Yan X, Li S, et al. High sensitivity refractive index sensor based on dual-core photonic crystal fiber with hexagonal lattice [J]. *Sensors*, 2016, 16 (10): 1655 – 1664.
- [11] Luan N, Wang R, Lyu W, et al. Surface plasmon resonance sensor based on D shaped microstructured optical fiber with hollow core [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (7): 8576 – 8582.
- [12] An G W, Li S, Zhang W, et al. A polarization filter of gold-filled photonic crystal fiber with regular triangular and rectangular lattices [J]. *Optics Communication*, 2014, 331 (22): 316 – 319.
- [13] Nagasaki A, Saitoh K, Koshiba M, et al. Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled with metal wires into cladding air holes [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (4): 3799 – 808.
- [14] Chen L, Zhang W, Zhang Z, et al. Design for a single-polarization photonic crystal fiber wavelength splitter based on hybrid-surface plasmon resonance [J]. *Photonics Journal*, 2014, 6 (4): 1 – 9.
- [15] Liu Q, Li S, Li J, et al. Photonic crystal fiber polarization filter based on coupling between core mode and SPP mode [J]. *Plasmonics*, 2015, 11 (3): 857 – 863.
- [16] An G, Li S, Yan X, et al. High-birefringence photonic crystal fiber polarization filter based on surface plasmon resonancer [J]. *Applied Optics*, 2016, 55 (6): 1262 – 1266.
- [17] 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.

(上接第 1534 页)

## 参考文献:

- [1] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16 (3): 497 – 510.
- [2] Le J, Lui J C S, Chiu D M. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks [C]//International Conference on Distributed Computing Systems. Beijing: IEEE Computer Society, 2009: 462 – 469.
- [3] Zhou Z, Zhou L. Network joint coding-aware routing for wireless ad hoc networks [C]//IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security. Houston: IEEE, 2010: 17 – 21.
- [4] Guo B, Li H, Zhou C, et al. Analysis of general network coding conditions and design of a free-ride-oriented routing metric [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60 (4): 1714 – 1727.
- [5] Vu T V, Nguyen T M T, Pujolle G. Distributed opportunistic and diffused coding in multi-hop wireless networks [C]//IEEE International Conference on Communications. Ottawa: IEEE, 2012: 5583 – 5587.
- [6] Chen J, Yuan Q, Du R, et al. MuCAR: a greedy multi-flow-based coding-aware routing in wireless networks [C]//IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking. Ilisan: IEEE, 2015: 310 – 318.
- [7] Hsu Y P, Abedini N, Ramasamy S, et al. Opportunities for network coding: to wait or not to wait [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2015, 23 (6): 1876 – 1889.
- [8] Mohapatra A, Gautam N, Shakkottai S, et al. Network coding decisions for wireless transmissions with delay consideration [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62 (8): 2965 – 2976.
- [9] 芦存博, 肖嵩, 权磊, 等. 一种编码感知路由低时延数据传输算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2016 (4): 17 – 22 + 146.  
(Lu Cun-bo, Xiao Song, Quan Lei, et al. Low-delay data transmission algorithm for coding-aware routing [J]. *Journal of Xidian University*, 2016 (4): 17 – 22.)
- [10] Wang W P, Wu W, Guan Q J, et al. TCAR: a new network coding-aware routing mechanism based on local topology detection [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21 (8): 3178 – 3185.