

含金属双缝的金属-电介质-金属波导耦合环形腔 Fano 共振慢光特性研究

陈 颖¹, 罗 佩¹, 田亚宁¹, 刘晓飞¹, 赵志勇¹, 朱奇光²

¹燕山大学电气工程学院河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

²燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 基于表面等离子亚波长结构的传输特性,提出一种含金属双缝的金属-电介质-金属波导耦合环形腔结构。由金属双缝波导谐振腔形成的较宽的连续态波与由环形谐振腔形成的较窄的孤立态波耦合干涉相消,形成 Fano 共振。结合耦合波理论,分析了该结构形成 Fano 共振的传输及相位特性。采用有限元分析法对该结构进行模拟仿真,定量分析了结构参数对结构慢光特性的影响,实现结构参数优化。结果表明,优化后的结构群折射率可达 205。该结构能为集成等离子慢光器件的设计提供有效的理论参考。

关键词 表面光学; 表面等离子; 金属-电介质-金属波导; Fano 共振; 慢光

中图分类号 O539 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0924002

Fano Resonance Slow Light Characteristics of Metal-Dielectric-Metal Waveguide Coupled Ring Cavity with Metallic Double-Slit

Chen Ying¹, Luo Pei¹, Tian Yanning¹, Liu Xiaofei¹, Zhao Zhiyong¹, Zhu Qiguang²

¹Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²Key Laboratory of Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Based on the transmission characteristics of surface plasma sub-wavelength structure, a metal-dielectric-metal waveguide coupled ring cavity structure with metallic double-slit is proposed. The Fano resonance is formed by the coupled destructive interference between wide wave with continuous state generated by a metallic double-slit waveguide resonator and narrow wave with isolated state generated by a ring cavity. According to the coupled wave theory, the transmission and phase characteristics of Fano resonance formed by this structure are analyzed. The finite element analysis method is used to simulate the structure, and the effects of the structural parameters on the slow light effect are analyzed quantitatively to optimize the structural parameters. The results show that the optimized group index can reach 205. This structure can provide an effective theoretical reference for the design of integrated plasma slow light devices.

Key words optics at surfaces; surface plasma; metal-dielectric-metal waveguide; Fano resonance; slow light

OCIS codes 240.6680; 230.7370; 260.5740

1 引 言

Fano 共振是由一个较宽的连续态波和一个较窄的孤立态波耦合干涉相消形成的,可获得尖锐的非对称光谱,其透射强度和频谱受结构参数的微小扰动后将发生极大的变化,在生物传感器、光开关以及慢光器件

收稿日期: 2017-04-26; **收到修改稿日期:** 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(61201112,61475133)、河北省自然科学基金(F2016203188,F2016203245)、河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2014056)

作者简介: 陈 颖(1980—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事微纳光学器件方面的研究。

E-mail: chenying@ysu.edu.cn

等领域有着潜在的应用价值^[1-4]。Fano 共振峰具有陡峭的相位分布,能够使光的传播发生延时,可用来实现慢光。Bera 等^[4]研究了电光聚合物杂交的完全片上硅平台耦合腔系统,并利用该系统产生了 Fano 共振。这种新型的 Fano 系统是基于槽型波导布拉格光栅几何形状产生的,由 Fano 共振产生的慢光效应可极大地提高了电光特性。Zafar 等^[5]设计了金属波导管中两个谐振模式破坏性干扰的一对谐振器及其导致的 Fano 共振的非对称线形。Fano 共振降低了共振区域附近的光速,实现慢光。

表面等离子金属-电介质-金属(MDM)波导具有传输距离长、易于制备和频率范围宽等优点^[6-8],在集成等离子器件设计中得到了广泛应用,其金属表面产生的表面等离子激元(SPPs)可以突破衍射极限,在纳米尺度上操控光的传播行为,为纳米器件的小型化和集成化提供了可能^[9-10]。目前已有不少利用基于 MDM 波导的 Fano 共振结构实现慢光的研究。Huang 等^[11]提出了一种 MDM 波导耦合圆盘谐振腔结构,并对慢光特性进行了研究,结果表明该结构产生的 Fano 共振可以实现慢光效应,其群折射率约为 88;Zhan 等^[12]提出了一种基于 Fano 共振的双矩形谐振腔 MDM 波导纳米等离子体结构,分析了 Fano 不对称因子 p 对结构的调节作用,还研究了这种纳米等离子体感应器中的慢光特性,其群折射率约为 20;Yun 等^[13]提出了一种槽型波导耦合方形腔结构,分析了 Fano 共振的形成过程,并对结构的慢光特性进行了研究,其群折射率约为 100。这些结构都是通过两个谐振波谷的耦合形成 Fano 共振,因此研究不同波型的耦合方式将会为等离子器件提供更多的设计方案。

本文提出了一种含金属双缝的 MDM 波导耦合环形腔结构,入射横磁(TM)波进入波导中,在 MDM 的交界面产生 SPPs,利用金属双缝组成波导谐振腔,入射光和 SPPs 的共同激发使得腔内形成了较宽的连续态谐振波峰。与此同时,SPPs 会耦合进入环形腔,当满足相位匹配条件时,SPPs 将在环形腔中发生谐振,形成较窄的孤立态谐振波谷。在近场作用下,两者耦合形成了 Fano 共振。采用耦合波理论分析了波峰与波谷耦合形成的 Fano 共振的传输和相位特性。采用有限元分析法进行仿真,定量分析结构参数 R 与 g 对结构慢光特性的影响,从而实现对结构慢光特性的调控。

2 模型建立与理论分析

2.1 结构模型的建立

所提出的含金属双缝的 MDM 波导耦合环形腔结构如图 1 所示。其中金属选取的材料为银(Ag),电介质层为空气,其折射率为 1。为了确保只有 TM_0 模式能够传播,波导和圆环的宽度 $w = 50 \text{ nm}$ ^[14];图 1 中 E_x 和 E_y 分别为 x 和 y 方向上的电场, H_z 为 z 方向上的磁场, g 为双细缝谐振腔与环形腔的耦合距离, h 为金属细缝的厚度, S 为双细缝谐振腔的长度, R 为圆环的中心半径, L 为整个波导结构的长度。Ag 的介电常数用德鲁德模型^[15]表示为

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma)], \quad (1)$$

式中 ω 为频率,等离子振荡频率 $\omega_p = 1.38 \times 10^{16} \text{ rad/s}$,碰撞频率 $\gamma = 0.273 \times 10^{14} \text{ rad/s}$,无穷介电常数 $\epsilon_\infty = 3.7$ 。

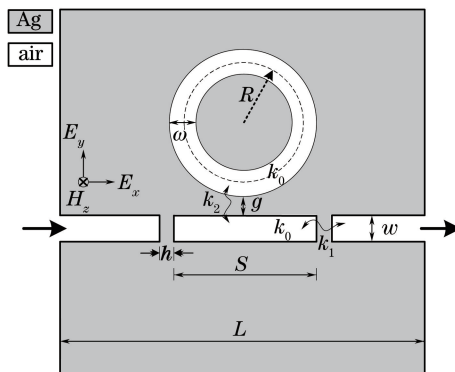


图 1 金属双缝 MDM 波导耦合环形腔结构

Fig. 1 Structure of MDM waveguide coupled ring cavity with metallic double-slit

2.2 理论分析

当入射光以 TM 波入射时, SPPs 在金属与电介质界面突破了衍射极限, 因此可在波导中传输。对于没有环形腔的金属双缝波导结构, 设置结构参数 $L = 1 \mu\text{m}$, $S = 220 \text{ nm}$ 。在金属双缝组成的腔内, 入射光与产生的 SPPs 发生谐振, 使腔内电磁场局域增强, 并使光易透过金属细缝, 从而在透射谱中形成了较宽的透射峰。如图 2(a) 所示, 随着 h 的减小, 透射率变大, 连续谱的宽度变宽, 这样可调节的范围变得更宽, 但谐振腔的品质因数随之减小。为了兼顾调节范围与谐振腔的品质因数, 选取 $h = 12 \text{ nm}$, 此时较宽的连续谱如图 2(b) 中蓝线所示。加入环形腔后, 设置结构参数 $R = 290 \text{ nm}$ 。光进入环形腔后与 SPPs 耦合并发生谐振, 产生一个孤立态的谐振波谷, 如图 2(b) 中红线所示。在近场作用下, 两者发生耦合并产生 Fano 共振, 如图 2(b) 中黑线所示。利用两个光学路径间的干涉相长和干涉相消的特殊相干 SPPs, 金属双缝谐振腔的宽频谐振模式可以分为两部分, 在图 2(b) 中可以清晰地看到, 一个谐振模式发生蓝移, 而另一个谐振模式发生红移。

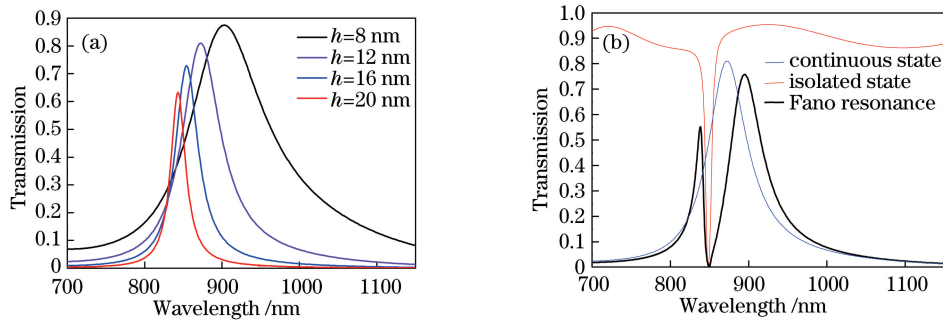


图 2 Fano 共振形成过程。(a) 没有环形腔时 h 对连续谱的影响; (b) 加入环形腔后的 Fano 共振谱

Fig. 2 Fano resonance formation process. (a) Influence of h on continuous spectra without ring cavity;

(b) Fano resonance spectra with ring cavity

采用耦合波理论^[16]分析 Fano 共振波的传输特性, 图 1 中 k_0 为腔内损耗衰减率, k_1 为 MDM 波导与金属双缝谐振腔的耦合系数, k_2 为金属双缝谐振腔与环形腔的耦合系数。 S_{i+} 和 S_{i-} ($i = 1, 2$) 分别表示端口的输入和输出波的振幅, 由于输出端口没有反射, 因此 $S_{2+} = 0$ 。 A_S 和 A_R 分别为金属双缝谐振腔和环形腔的输出波的归一化振幅, 它们随时间的演化过程可表示为

$$\frac{dA_S}{dt} = (j\omega_S - 2k_1 - k_2 - k_0)A_S + j\sqrt{k_1}(S_{1+} + S_{2+}) + j\sqrt{k_2}A_R = j\omega A_S, \quad (2)$$

$$\frac{dA_R}{dt} = (j\omega_R - k_2 - k_0)A_R + j\sqrt{k_2}A_S = j\omega A_R, \quad (3)$$

式中 ω_S 和 ω_R 分别为金属双缝谐振腔和环形腔的谐振频率。该结构的输入端和输出端为镜像结构, 在耦合波导中输出波的振幅满足:

$$S_{2-} = j\sqrt{k_1}A_S. \quad (4)$$

该耦合波导结构的透射率 T 可以由(2)~(4)式联立解得:

$$T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{k_1}{j(\omega - \omega_S) + 2k_1 + k_2 + k_0 + k_2 / [j(\omega - \omega_R) + k_2 + k_0]} \right|^2. \quad (5)$$

当 $\omega = \omega_S$, 且 ω_S 和 ω_R 相互接近时, 将产生 Fano 共振。 Fano 共振使得金属双缝谐振腔的宽频谐振模式分为两部分, 并且使两个波峰和一个波谷处发生较快的相位变化, 从而使光的传播发生延时。相位 ϕ 与 T 的关系为^[17]

$$\phi = \arg(\sqrt{T}). \quad (6)$$

图 3 为选取上述结构参数时的相位分布图, 可以看出, 两个波峰和一个波谷处发生较快的相位变化, 且波谷处相位变化最快。

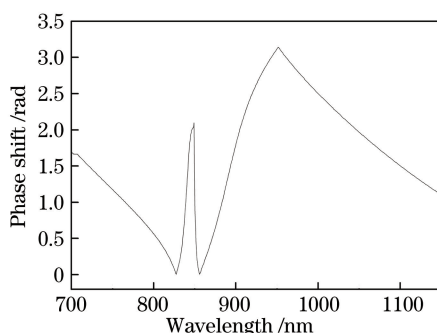


图 3 Fano 共振波的相位变化

Fig. 3 Phase change of Fano resonance wavelength

3 结构的慢光特性分析

Fano 共振使光相位迅速改变,在慢光器件中具有广泛应用^[18]。群折射率是研究慢光特性的一个重要参数指标,它体现了非单色光的传播速度。大的群折射率能对光传播起到延时作用,群折射率 n_g 可表示为^[19]

$$n_g = \frac{c}{v_g} = \frac{c}{L} \times \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}, \quad (7)$$

式中 c 为光速, v_g 为群速度, $L=1 \mu\text{m}$, $\phi(\omega)$ 为传输光的相移。

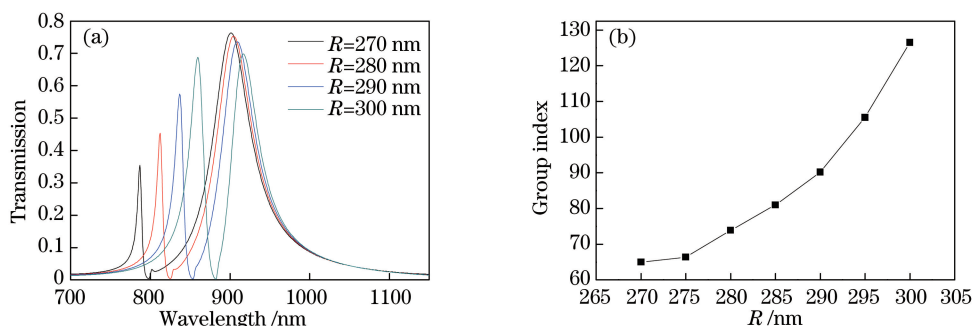
Fano 共振对结构参数十分敏感,通过调节结构参数 R 和 g 可以改变透射谱中的峰(谷)型变化,其谐振模式的品质因子 Q 将发生改变, Q 可表示为^[20]

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (8)$$

式中 λ 为谐振模式的中心波长, $\Delta\lambda$ 为谐振峰(谷)的半峰全宽。 Q 值越大,相位变化越快,从而实现对结构慢光特性的调节。

3.1 结构参数 R 对结构慢光特性的影响

选取 $g=10 \text{ nm}$, $S=220 \text{ nm}$, $h=12 \text{ nm}$, 对 R 从 270 nm 到 300 nm 进行参数化扫描,步长为 10 nm , 对应的透射谱变化如图 4(a)所示。随着 R 的增大,圆环的谐振腔长变大,根据谐振条件^[21],圆环的谐振模式波长将发生红移,两峰的位置越来越远,即波谷中心波长红移并伴随着半峰全宽的减小,则 Q 值变大,相位变化加快,该波导结构的群折射率随之增大。为了定量地分析 R 对慢光特性的影响,如图 4(b)所示,进一步对 R 从 270 nm 到 300 nm 进行参数化扫描,步长为 5 nm , 根据(7)式计算出对应的群折射率值。可以发现,随着 R 的增加,群折射率值呈增大趋势,当 $R=300 \text{ nm}$ 时,群折射率值最大。

图 4 R 对慢光特性的影响。(a)不同 R 对 Fano 共振的影响;(b)不同 R 对群折射率的影响Fig. 4 Influence of R on slow light characteristics. (a) Influence of different R on Fano resonance; (b) influence of different R on group index

3.2 结构参数 g 对结构慢光特性的影响

选取 $R=300 \text{ nm}$, $S=220 \text{ nm}$, $h=12 \text{ nm}$ 。对 g 从 10 nm 到 18 nm 进行参数化扫描,步长为 2 nm , 对应

的透射谱变化如图 5(a)所示。随着 g 的减小,耦合作用增强,波谷处的干涉作用增强,两峰的距离越来越远,即波谷的半峰全宽变小,但其波谷的中心波长发生蓝移。可以看出波谷的相位变化先快后慢,因此在某个 g 下存在一个最大群折射率。为了定量分析 g 对慢光特性的影响并,对其进行优化,如图 5(b)所示,进一步对 g 从 10 nm 到 18 nm 进行参数化扫描,步长为 1 nm,根据(7)式计算出对应的群折射率值。可以发现,随着 g 的增加,群折射率值呈先增大后减小的趋势,当 $g = 13$ nm 时,群折射率值最大。

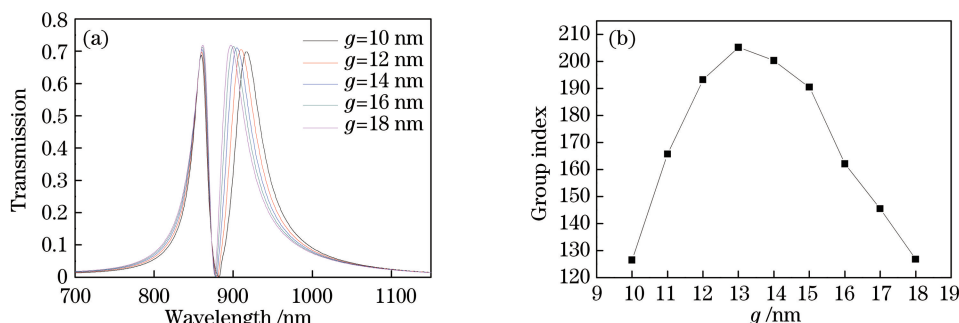


图 5 g 对慢光特性的影响。(a)不同 g 对 Fano 共振的影响;(b)不同 g 对群折射率的影响

Fig. 5 Influence of g on slow light characteristics. (a) Influence of different g on Fano resonance; (b) influence of different g on group index

3.3 参数优化后的结构慢光特性

通过对 R 和 g 进行参数化扫描,可以看出,当 $R = 300$ nm 且 $g = 13$ nm 时,群折射率得到优化。利用优化后的结构参数构建波导结构,分析其慢光特性。根据(6)式,可以求出不同波长下的相位变化。光穿过波导结构,其相移在 Fano 共振处的异常与正常相分散以及一个最陡峭的负相位斜率使光的延迟很大,图 6(a)为结构优化后相位随波长变化的关系图。与图 3 所示的未优化结构参数的相位变化图相比,图 6(a)中波谷处的相位变化更快。根据(7)式,得到参数优化后的结构具有更大的群折射率,且增加了光的延时。进一步计算出不同波长条件下对应的群折射率,由图 6(b)可以看出,某一波长下的群折射率最大,可达 205。

综合以上分析,结构参数 R 和 g 对结构的慢光特性具有调节作用,通过优化 R 和 g ,可以得到理想的慢光特性。

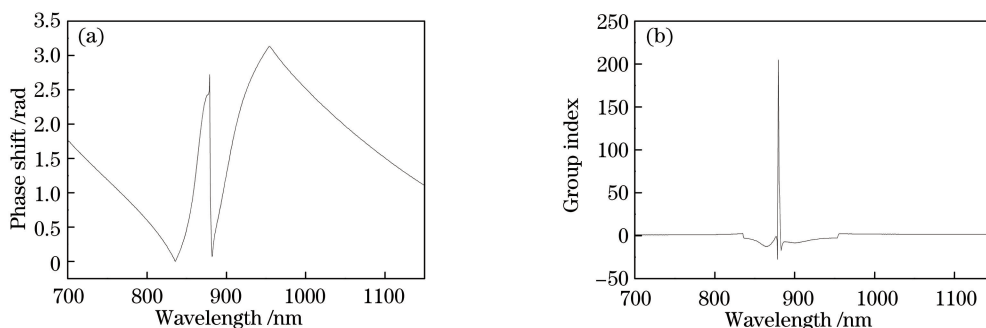


图 6 优化结构参数后的慢光特性分析。(a)不同波长下对应的相位;(b)不同波长下对应的群折射率

Fig. 6 Analysis of slow light characteristics after optimizing structural parameters. (a) Phases corresponding to different wavelengths; (b) group indexes corresponding to different wavelengths

4 结 论

提出了一种含金属双缝的 MDM 波导耦合环形腔结构,在近场作用下,由金属双缝波导谐振腔形成的较宽的连续态波和由环形谐振腔形成的较窄的孤立态波发生耦合,并形成 Fano 共振。Fano 共振使光相位发生骤变,从而实现慢光。根据耦合波理论,分析了结构形成 Fano 共振的传输及相位特性。通过调节结构参数 R 和 g ,对结构的慢光特性进行调节,从而优化结构参数。当 $R = 300$ nm 和 $g = 13$ nm 时,结构的群折射率可达 205。该波导结构可实现光子器件的小型化和集成化,并为慢光器件的设计提供有效的理论参考。

参 考 文 献

- [1] Lee K L, Huang J B, Wu S H, *et al.* Ultrasensitive biosensors using Fano resonances in double-layer gold nanostructures[C]. International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN), 2013: 137-138.
- [2] Yu Y, Xue W, Hu H, *et al.* All-optical switching improvement using photonic-crystal Fano structures[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 0600108.
- [3] Watanabe Y, Hino K I, Hase M, *et al.* Polaronic quasiparticle picture for generation dynamics of coherent phonons in semiconductors: Transient and nonlinear Fano resonance[J]. Physical Review B, 2015, 95(1): 014301.
- [4] Bera A, Roussey M, Kuittinen M, *et al.* Slow-light enhanced electro-optic modulation with an on-chip silicon-hybrid Fano system[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2233-2236.
- [5] Zafar R, Salim M. Achievement of large normalized delay bandwidth product by exciting electromagnetic-induced transparency in plasmonic waveguide[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(10): 7200306.
- [6] Zhao Hai, Song Qing, Sun Haili, *et al.* Study on transmission characteristics of a hybrid triangle wedge surface plasmonic polaritons waveguide with subwavelength mode confinement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091301.
赵海, 宋卿, 孙海丽, 等. 一种具有亚波长模式限制的三角楔形混合表面等离子激元波导传输特性研究[J]. 激光与光电子进展, 2015, 52(9): 091301.
- [7] He Z, Li H, Zhan S, *et al.* Tunable multi-switching in plasmonic waveguide with Kerr nonlinear resonator[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15837.
- [8] He Z, Li H, Zhan S, *et al.* Oscillator model analysis for slow-light in bright-dark-dark waveguide systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(22): 2371-2374.
- [9] Gramotney D, Bozhevolny S. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 83-91.
- [10] Si G, Zhao Y, Lü J, *et al.* Reflective plasmonic color filters based on lithographically patterned silver nanorod arrays[J]. Nanoscale, 2013, 5(4): 6243-6248.
- [11] Huang B, Meng H, Wang Q, *et al.* Plasmonic-induced transparency and slow-light effect based on stub waveguide with nanodisk resonator[J]. Plasmonics, 2016, 11(2): 543-550.
- [12] Zhan S, Peng Y, He Z, *et al.* Tunable nanoplasmonic sensor based on the asymmetric degree of Fano resonance in MDM waveguide[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 22484.
- [13] Yun B F, Hu G H, Zhang R H, *et al.* Fano resonances in a plasmonic waveguide system composed of stub coupled with a square cavity resonator[J]. Journal of Optics, 2016, 18(5): 055002.
- [14] Yun B F, Hu G H, Cui Y P, *et al.* Theoretical analysis of a nanoscale plasmonic filter based on a rectangular metal-insulator-metal waveguide[J]. Journal of Physics D, 2010, 43(38): 385102.
- [15] Yang Yunru, Guan Jianfei. Numerical study of plasmonic filter based on metal-insulator-metal waveguide[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5): 057301.
杨韵茹, 关建飞. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 057301.
- [16] Li Q, Wang T, Su Y, *et al.* Coupled mode theory analysis of mode-splitting in coupled cavity system[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 8367-8382.
- [17] Zhan S, Li H, Cao G, *et al.* Slow light based on plasmon-induced transparency in dual-ring resonator-coupled MDM waveguide system[J]. Journal of Physics D, 2014, 47(20): 205101.
- [18] Akram M J, Ghafoor F, Khan M M, *et al.* Control of Fano resonances and slow light using Bose-Einstein condensates in a nanocavity[J]. Physical Review A, 2017, 95(2): 023810.
- [19] Lu H, Liu X, Mao D. Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in multi-nanoresonator-coupled waveguide systems[J]. Physical Review A, 2012, 85(5): 053803.
- [20] Chen Ying, Shi Jia, Cao Huiying, *et al.* Study on refractive index sensing property of air gate photonic crystal F-P cavity based on evanescent wave resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1123001.
陈颖, 石佳, 曹会莹, 等. 基于倏逝波谐振的空气栅光子晶体 F-P 腔折射率传感特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1123001.
- [21] Pang Shaofang, Qu Shixian, Zhang Yongyuan, *et al.* Filter characteristic research of MIM waveguide based on L shaped resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0623001.
庞绍芳, 屈世显, 张永元, 等. 基于 L 形谐振腔 MIM 波导结构滤波特性的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0623001.