

文章编号: 2095-2163(2019)03-0206-06

中图分类号: O539

文献标志码: A

基于单元结构非对称的表面等离子体光学滤波器

文 奎, 罗晓清, 易建基, 陈志勇, 朱卫华, 王新林

(超快微纳技术与激光先进制造实验室(南华大学), 湖南 衡阳 421001)

摘要: 本文采用三维时域有限差分方法,研究了周期性亚波长几何结构非对称十字形单元孔阵列结构的增强光透射特性,发现单元结构的对称性对表面等离子体效应的影响存在显著差异。研究表明:几何结构非对称十字形单元结构在垂直于偏振方向时会形成强度不同的局域表面等离子体共振模式,进而引起近红外波段透射峰谱线发生分裂,而在平行于偏振方向时则无谱线分裂现象出现。此外,在此基础上,设计并数值验证了一种基于周期性非对称十字形孔阵列的表面等离子体光学滤波器。该滤波器可通过改变入射光偏振方向来实现对光的调控。本文的研究结果为表面等离子体光子器件的设计提供了新思路,并将拓展金属纳米结构在通信及信息处理领域的应用范围。

关键词: 十字形结构; 表面等离子体; 光学滤波器

Surface plasmonic optical filter based on asymmetric sub-wavelength structure

WEN Kui, LUO Xiaoqing, YI Jianji, CHEN Zhiyong, ZHU Weihua, WANG Xinlin

(Hunan Province Key Laboratory for Ultra-Fast Micro/Nano Technology and Advanced Laser Manufacture (University of South China), Hengyang Hunan 421001, China)

【Abstract】 The paper numerically investigates the enhanced optical transmission (EOT) properties of the periodic sub-wavelength cross-shaped hole arrays with asymmetry of geometric structure in metal films by using three-dimensional finite-difference time-domain method. It is found that the symmetry of unit structure has a great impact on the surface plasmons (SPs) of the cross-shaped hole arrays. These behaviors also suggest that the localized Surface Plasmons resonance mode can be excited only if the asymmetric direction of unit structure is perpendicular to the polarization direction of incident light, where there exist two separated transmission peaks. Moreover, by taking advantage of the EOT effect in the periodic sub-wavelength geometrically asymmetric cross-shaped hole arrays, the paper proposes a plasmonic optical filter (POF) in the near-infrared region. The realization of POF effect is possible to regulate the properties of the incident optical field by changing its polarization direction. The results promise new avenues for plasmonic devices and enrich the application range of metallic structures in the field of optical communications and information processing.

【Key words】 cross-shaped hole; surface plasmons; plasmonic optical filter

0 引言

表面等离子体(SPs)是入射光与金属表面自由振荡的电荷相互作用形成的表面电磁波,包含表面等离子体极化激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)和局域表面等离子体(Localized Surface Plasmons, LSPs)。1998年,Ebbesen等人^[1]首次发现,当入射光通过亚波长尺度的金属孔阵列时,会出现增强的光透射现象(Enhanced Optical Transmission, EOT),并提出这种现象主要由表面等离子共振引起的。随后,人们对周期性亚波长金属薄膜小孔阵列结构的EOT现象发表了大量的理论和实验研究成果^[2-5]。近年来,人们对不同形状亚波长孔阵列结构的EOT

特性进行了大量研究,例如:十字形孔^[6-7]、矩形孔^[8-9]、太极形孔^[10]、椭圆形孔^[11]等亚波长孔单元结构,发现当单元结构的几何形状发生变化时,在结构内有大量的电荷积聚,使得场强明显增强,这表明孔的几何形状对表面等离子体效应有很大影响。同时,也有学者对环形^[12]、插入非对称开口环的圆形孔^[13]、I字形孔^[14]等亚波长几何对称性孔阵列单元结构的表面等离子体效应进行了研究,发现在可见光波段和近红外波段的透射峰存在可调节的峰位置与峰值大小,以及分裂形成的2个或多个透射峰等现象,该结果还表明单元结构几何对称性对其光透射特性存在较大的影响。

在实际应用中,许多表面等离子体光学器件,如

作者简介: 文 奎(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:光电子与激光技术及应用;王新林(1970-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向:光电子与激光技术及应用。

通讯作者: 王新林 Email: wx1_ly000@aliyun.com

收稿日期: 2019-03-06

SP 光调节器、SP 光开关、SP 滤波器,都是基于表面等离子体的亚波长尺度、高局域电磁场和增强的局域场等优良特性实现的。对于等离子体光学滤波器(Plasmon Optical filter, POF)而言,通过调节结构的几何参数可以改善滤波器中 SPs 的激发或透射特性。因此,光场传输路径的控制 SPs 领域引起了人们广泛的关注^[15-17]。例如,在波导结构中建立双核光子晶体光纤,通过在外包层中填充不同介质,进而调节外磁场来实现 POF^[18];设计由不同锯齿形波导组成的 POF 器件,使具有不同传输路径的光场存在可调的耦合相互作用^[19]。然而,上述通过非线性材料填充滤波器来增强全光控制装置的实现 POF 器件的方法仍存在一些缺陷,如结构复杂、尺寸大、集成困难、损耗高等。此外,在光场路径调控上还面临着不可避免的操作误差和外部磁场的干扰。因此,本文研究了几何结构非对称的十字形单元结构孔阵列的表面等离子体光传输特性,结果表明:通过改变十字形单元结构的几何非对称方向(垂直或平行),发现在近红外波段透射峰只在光垂直于入射时发生分裂。同时,研究提出了一种基于近红外区域周期性非对称十字形单元结构孔阵列的新型 POF 器件,通过改变入射光的偏振方向,可以调节 EOT 峰在近红外区的分裂,进而实现 POF 与近红外波段光场的可调传输。

1 计算模型

通过改变十字形的矩形臂长,从而构造出具有非对称特征的非对称十字形孔结构,如图 1 所示。图 1 中,白色部分是空气,灰色部分是金属银(Ag)。 P_x 和 P_z 分别是沿着 X 和 Z 轴的数组周期; W 为十字形矩形臂的宽度; L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别为十字形结构的 4 个矩形臂长; L 为十字形结构的长度;银膜的厚度为 50 nm,并且该膜被放置在厚度为 225 nm 的石英衬底上。利用三维时域有限差分(3D-FDTD)方法,可以求解周期性亚波长金属小孔中光的传播过程^[20]。时间步长和空间步长的设置满足数值稳定性条件。采用经过修正的 Drude 模型描述金属银的色散特性^[21]。石英衬底的介电常数为 2.25。入射光沿 Y 方向从石英衬底的一侧垂直传播到金属膜表面,电场沿 Z 方向偏振。单元结构的 X 和 Z 方向边界采用周期性边界条件, Y 方向前后的 2 个边界采用完全匹配层作为吸收边界条件。亚波长金属小孔的 EOT 现象使用标准化透过率 T_{norm} 来表征^[22];研究推得其数学公式如下:

$$T_{norm}(\lambda) = \frac{T(\lambda)}{S_{hole}/S_{cell}} = \frac{P_{out}(\lambda) S_{cell}}{P_{in}(\lambda) S_{hole}} \quad (1)$$

其中, $P_{out(in)}$ 是流出(入)金属薄膜的电磁场功率流, $S_{cell(hole)}$ 是周期阵列的一个单元(孔)的截面积。

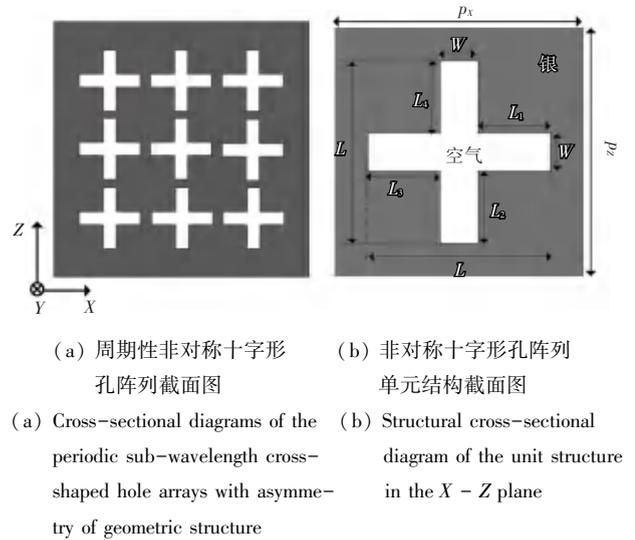


图 1 具有非对称特征的非对称十字形孔结构
Fig. 1 Asymmetric cross-shaped hole structure with asymmetric features

2 结果与讨论

2.1 非对称十字形和对称十字形结构的透射特性的比较

为了确认单元结构的几何对称性对表面等离子体效应的影响,文中对比研究了非对称十字形和对称性十字形结构的光透射特性。结构几何参数设置为:十字形孔的长度 L 为 454.5 nm、宽度 W 为 60 nm, $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 197.25$ nm,而平行和垂直偏振方向非对称十字形分别将 L_1 或 L_4 减少到 97.25 nm,在平行或垂直偏振方向形成几何结构非对称,其他参数保持一致。3 种结构的周期均为 $P_x = P_z = 600$ nm。

当 $L_4 \neq L_2$ 或 $L_1 \neq L_3$ 时,单元结构在平行或垂直偏振方向形成了非对称的十字形结构。图 2 是十字形、平行偏振方向几何结构非对称十字形、垂直偏振方向几何结构非对称十字形在 Y 方向 250 nm 处(x, z) 平面内电场大小 $|E_z|$ 空间分布。其中,当入射光的偏振方向平行于 Z 方向时,对比图 2(a) 与图 2(c) 的电场分布图,可以观察到垂直于偏振方向孔内产生较强的电场分布,形成了 LSPs 共振。特别地,图 2(c) 中由于 L_1 的减小导致垂直于偏振方向上产生了左右两边的大小不一致的电场分布,而图 2(b) 中即使减小 L_4 ,仍在平行于偏振方向上产生相同的电场强度分布。

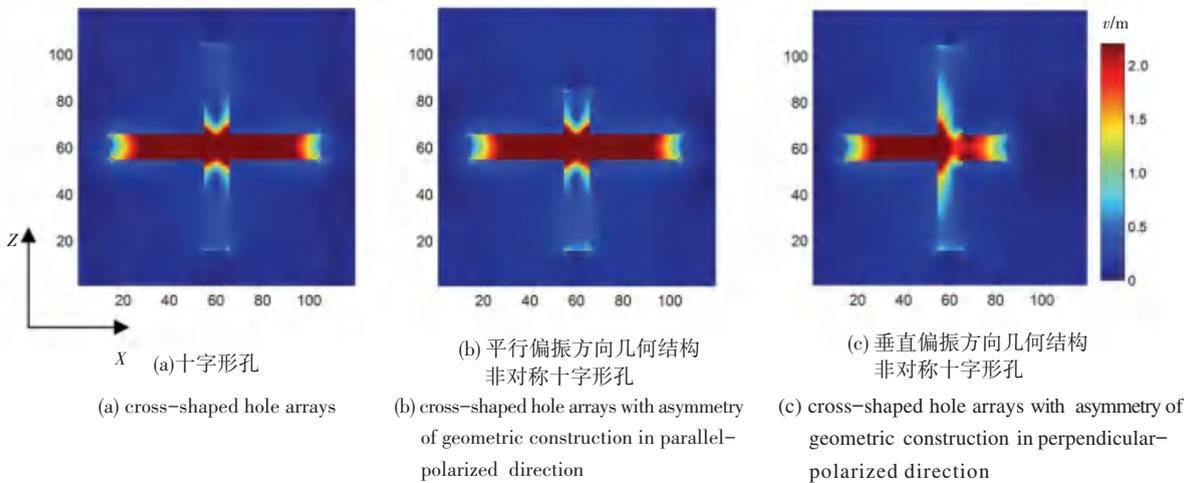


图2 正方形阵列 $P_x = P_z = 600 \text{ nm}$, 在沿 Z 方向偏振的入射光垂直照射下, 十字形孔阵列与非对称十字形孔阵列单元结构在 Y 方向 250 nm 处 (x, z) 平面内电场大小 $|E_z|$ 空间分布图 (颜色条单位为 v/m)

Fig. 2 Distribution of electric field $|E_z|$ in (x, z) plane at 250 nm in Y direction. The unit of the color bar is v . All of three hole arrays periods are 600 nm ($P_x = P_z = 600 \text{ nm}$)

图3给出了3种结构在近红外波段的标准化透射谱图。显然, 可以观察到, 在平行于偏振方向存在几何结构非对称的十字形结构相比于几何结构对称的十字形结构, 在近红外波段的共振透射峰峰值略有增加, 且未出现透射峰谱线分裂现象。值得注意的是, 当十字形结构在垂直于偏振方向存在几何结构非对称时, 在近红外波段的透射峰出现分裂的双峰谱线现象, 这是由于垂直于偏振方向结构的几何结构的非对称性导致了电场强度不同的局域表面等离子体共振的形成, 从而引起透射峰的分裂。因此, 当入射光偏振方向发生改变, 非对称十字形孔阵列结构在近红外波段透射峰会发生分裂, 此实验结论与文献[23]中一致。

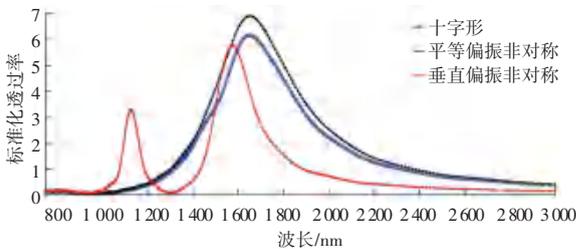


图3 十字形孔阵列和平行及垂直偏振方向非对称十字形孔阵列的标准化透射率谱, 其中 $P_x = P_z = 600 \text{ nm}$

Fig. 3 Normalized transmittance spectra of cross-shaped hole and cross-shaped hole arrays with asymmetry of geometric structure in square arrays with $P_x = P_z = 600 \text{ nm}$

2.2 基于周期性非对称十字形孔阵列的表面等离子体光学滤波器

根据对称性对表面等离子体效应在近红外波段透射峰的影响, 研究选用几何结构存在非对称性的

十字形孔单元结构作为研究对象, 设计了一种新型的基于表面等离子体的POF器件。该POF器件具有尺寸小(nm 级), 结构简单(仅由金属银薄膜和石英基底构成), 制作方便(只需打出简易的孔结构)且通道可调等优点。

图4描述了本文提出的新型滤波器原型器件中的立体图和单元结构图, 白色部分代表电介质(Air), 灰色部分代表金属(Ag)。由于银在可见光和近红外波段具有吸收损耗较小的优点, 因此选择银作为结构中的金属材料; 电介质则选择空气。金属薄膜厚度为 50 nm , P_x 为 X 方向的阵列周期, P_z 为 Z 方向的阵列周期。该结构整体放置在相对介电常数为 2.25 的石英基底上, 石英基底的厚度为 225 nm 。入射光从石英基底一侧朝着 Y 方向垂直金属薄膜表面传播, 电场方向沿着 Z 方向。

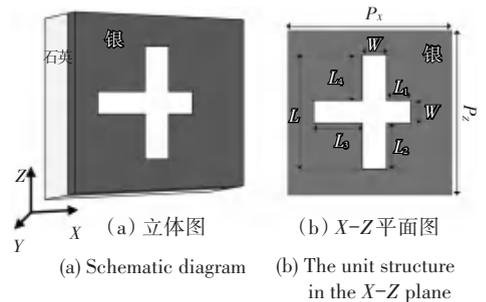


图4 周期性非对称十字形孔阵列滤波器单元结构示意图

Fig. 4 Structural schematic diagram of plasmonic optical filter via incident light acting on the periodic arrays with geometrically asymmetry cross-shaped unit structure

周期性几何结构非对称十字形孔单元结构阵列

滤波器的结构参数设定为: 十字形孔的长度 L 为 454.5 nm、宽度 W 为 60 nm, $L_2 = L_3 = L_4 = 197.25$ nm, 而垂直偏振方向非对称十字形矩形臂 L_1 变为 97.25 nm。单元结构周期 $P_x = P_z = 600$ nm。如图 5 所示, 在近红外波段透射峰谱线发生分裂。研究认为滤波器近红外波段共振透射峰分裂后的 2 个子透射峰的中心波长 1 和 2 分别为该滤波器的工作波长。同时, 引入滤波比这个性能指标定量地描述滤波器对光的滤波效果, 其定义为^[24]:

$$PSR = \max(T_{\max,1}, T_{\max,2}) / \min(T_{\max,1}, T_{\max,2}). \quad (2)$$

其中, T_{\max} 表示滤波器处于工作状态时中心波长处的透射峰值, 下标 1 和 2 分别为滤光通道 1 和 2。

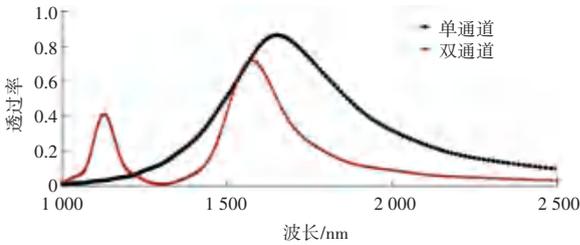


图 5 基于非对称十字形孔阵列的滤波器透过率谱

Fig. 5 The transmittance spectra of cross-shaped hole arrays with asymmetry of geometric structure spectrometer

当周期性几何结构非对称十字形孔单元结构阵列滤波器处于工作状态时将呈现 2 种工作模式, 对此可做阐释如下。

(1) 当入射光偏振方向平行于几何结构非对称方向时, 仅有一个通道处于工作状态, 其共振透射峰位置波长为 1 650 nm, 透过率为 0.863 0。

(2) 当入射光偏振方向垂直于几何结构非对称方向时, 2 个通道同时处于工作状态, 其共振透射峰位置波长 1 为 1 128 nm, 2 为 1 571 nm, 透过率分别为 0.410 7 和 0.718 0。

周期性几何结构非对称十字形孔阵列通过旋转入射光偏振方向改变了单元结构上发生 LSPs 共振的模式, 从而使周期性金属小孔阵列近红外波段的透射峰发生分裂, 实现一个基于表面等离子体的通道可控型滤波器。

为了进一步研究几何结构参数对滤波器性能的影响, 本文改变十字形结构中一条矩形臂 L_1 的长度, 参数设置为: 十字形孔的长度 L 为 454.5 nm、宽度 W 为 60 nm, $L_2 = L_3 = L_4 = 197.25$ nm, 单元结构周期为 $P = 600$ nm 不变, L_1 设置 5 组参数, 即: 117.25 nm、137.25 nm、157.25 nm、177.25 nm、197.25 nm。

为此, 研究得到的仿真测试效果如图 6 所示, 图 6 中左侧的 5 幅图表示非对称十字形孔阵列矩形臂 L_1 不同时 Y 方向 250 nm 处 (x, z) 平面内电场大小 $|E_z|$ 空间分布图 (颜色条单位为 v/m)。图 6 右侧图给出了非对称十字形孔阵列矩形臂 L_1 不同的标准化透过率谱, 其中 $P_x = P_z = 600$ nm, L_1 分别为 117.25 nm、137.25 nm、157.25 nm、177.25 nm、197.25 nm。随着矩形臂 L_1 的减小, 近红外波段透射峰的分裂现象更加明显。其中, 第一峰的峰值和位置未出现明显变化, 第二峰的位置随着 L_1 的减小而蓝移, 并且分裂程度增大。这是由于矩形臂 L_1 的减小导致 L_1 中 LSPs 共振强度也随之减小, 使得透射峰峰值减小。

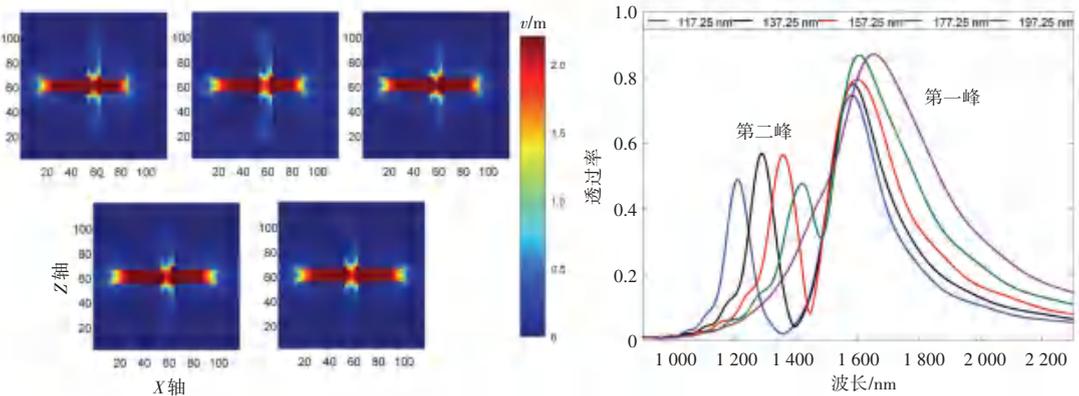


图 6 改变十字形结构中一条矩形臂 L_1 的长度对滤波器性能影响测试

Fig. 6 The effect test of changing the length of a rectangular arm L_1 in the cross-shaped structure on the filter performance

3 结束语

本文采用3D-FDTD方法数值研究了几何结构非对称十字形孔单元结构阵列的增强光透射特性,发现几何结构的对称性对表面等离子体效应存在强烈的影响;当十字形结构在垂直入射光偏振方向存在几何结构对称时,在十字形内部产生对称的LSPs共振模式,且在近红外波段产生一个透射峰;当十字形结构在垂直入射光偏振方向存在几何结构非对称时,在十字形内部产生强度分布不同的LSPs共振模式,同时,在近红外波段的共振透射峰发生谱线分裂。

另外,根据表面等离子体效应的单元结构对称性分布特征依赖性,提出了一种基于周期性金属几何结构非对称十字形孔单元结构阵列的POF。采用3D-FDTD方法数值验证了该滤波器可通过改变入射光偏振方向来调节单元结构上产生的LSPs共振的模式,从而使近红外波段透射峰发生谱线分裂,实现对光的滤光控制,并且通过改变单元结构几何参数可以调节POF的铝箔性能。本文为表面等离子体光子器件的设计提供了新思路,拓展了金属微纳结构在通信及信息处理领域的应用范围。

近红外表面等离子体的电磁场阐明了前所未有的空间限制,使其对增强短程多模数据通信和集成红外光子学具有极大的吸引力^[25]。值得注意的是,亚波长光学可以促进新光学器件和光子电路的实现。从而为等离子体器件的设计提供了一种新的方法,丰富了金属结构在光通信和信息处理领域的应用范围。实现的POF效应也可能对生物医药、红外遥感技术和红外摄影产生重大影响^[26-27]。

参考文献

[1] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668):667-669.

[2] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950):824-830.

[3] CHEN Lin, ZHU Yiming, ZANG Xiaofei, et al. Mode splitting transmission effect of surface wave excitation through a metal hole array [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(3):60-65.

[4] ZHANG S, BAO K, HALAS N J, et al. Substrate-induced Fano resonances of a plasmonic nanocube: A route to increased-sensitivity localized surface plasmon resonance sensors revealed [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(4):1657-1663.

[5] HUANG Wanxia, GUO Juanjuan, WANG Maosheng, et al. Sensor based on Fano resonances of plane metamaterial with narrow slits [J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(10):909-912.

[6] DESPROLET R G, BOUTAMI S, LHOSTIS S, et al. Angular and polarization properties of cross-holes nanostructured metallic filters

[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24):29412-29424.

[7] LIN L, ROBERTS A. Light transmission through nanostructured metallic films: Coupling between surface waves and localized resonances [J]. *Optics Express*, 2011, 19(3):2626-2633.

[8] KOERKAMP K J K, ENOCH S, SEGERINK F B, et al. Strong influence of hole shape on extraordinary transmission through periodic arrays of subwavelength holes [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(18):3901-3904.

[9] KYOUNG J, ROH Y G. Extraordinary optical transmission induced by strong plasmon-phonon coupling: Shape resonance versus non-shape resonance [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(19):193104-193112.

[10] WANG Xinlin, LIU Hui, LUO Hu, et al. Optical filtering properties of subwavelength Tai-chi-shaped metal hole arrays [J]. *Optics Communications*, 2015, 340:56-62.

[11] GORDON R, BROLO A G, MCKINNON A, et al. Strong polarization in the optical transmission through elliptical nanohole arrays [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(3):037401-037405.

[12] HU Dan, XIE Chongqing, LIU Ming, et al. High transmission of annular aperture arrays caused by symmetry breaking [J]. *Physical Review A*, 2012, 85(4):045801-045805.

[13] HUANG Wanxia, WANG Qianjin, YIN Xiaogang, et al. Optical resonances in a composite asymmetric plasmonic nanostructure [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(11):114310.

[14] YIN Xiaogang, HUANG Chengping, SHEN Zhiqiang, et al. Splitting of transmission peak due to the hole symmetry breaking [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(16):161904.

[15] EMBORAS A, HOESSBACHER C, HAFFNER C, et al. Electrically controlled plasmonic switches and modulators [J]. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 2015, 21(4):4600408-4600416.

[16] SUN Taiming, DENG Zhixiang, SHENG Jiabin, et al. A compact optical switch via plasmonics of subwavelength circular-sharp hole arrays in metal films [J]. *Annalen der Physik*, 2017, 530(3):1-6.

[17] CHEN Lei, ZHANG Weigang, ZHANG Zhao, et al. Design for a single-polarization photonic crystal fiber wavelength splitter based on hybrid-surface plasmon resonance [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4):2200909.

[18] WANG Haiyang, YAN Xin, Li Shuguang, et al. Tunable surface plasmon resonance polarization beam splitter based on dual-core photonic crystal fiber with magnetic fluid [J]. *Optical Quantum Electronics*, 2017, 49(11):368-378.

[19] GAO Xi, SHI Jinhui, SHEN Xiaopeng, et al. Ultrathin dual-band surface plasmonic polariton waveguide and frequency splitter in microwave frequencies [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(15):151912-151916.

[20] TAFLOVE A, HAGNESS S C. *Computational electrodynamics: The finite difference time-domain method* [M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2000.

[21] LALANNE P, BESBES M, HUGONIN J P, et al. Numerical analysis of a slit-groove diffraction problem [J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2007, 2:07022.

[22] RUAN Zhichao, QIU Min. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: The role of localized waveguide resonances [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(23):233901.