

# 双缝波导结构表面等离子体可见光分束器设计

王继成 刘红娇 蔡增艳 吴涛 张羽婵 杜茗晗 许益平

江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

**摘要** 理论设计了一种金属-介质-金属(MIM)双缝结构的表面等离子体可见光分束器。利用表面等离子体效应及经典光学干涉原理,改变双缝波导结构中的填充介质、结构厚度、狭缝宽度、双缝宽度等参数,可使波长不同的两束可见光通过双缝亚波长结构后实现表面等离子体分束的效果。设计过程中采用时域有限差分法(FDTD)进行数值模拟,分别模拟计算了双缝宽度相同填充介质不同和双缝填充介质相同宽度不同两种情况下的光场分布,且都得到了较好的分束效果,最大分束比可达12。该设计结构简单,可以通过电子束刻蚀系统等实验设备加工,具有较好的应用前景。

**关键词** 表面光学;表面等离子体;分束器;时域有限差分算法;金属-介质-金属结构;亚波长

**中图分类号** TN256 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP51.102301

## Design of Surface Plasmon Dichroic Splitter with Two Metallic Slits

Wang Jicheng Liu Hongjiao Cai Zengyan Wu Tao Zhang Yuchan

Du Minghan Xu Yiping

School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

**Abstract** The model of plasmonic dichroic splitter in metal-insulator-metal (MIM) structure with two subwavelength metallic slits is proposed in theory. The different visible lights passing through the double slits subwavelength structure produce optical splitting effects by filling with different insulators and setting the slit width, double slits width and thickness of the waveguide structure of double slit. The splitting effects are explained by using surface plasmon's principle and classical optics interference principle. Finite-difference time-domain (FDTD) method is adopted for numerical simulation. We simulate the light field distribution in two cases of double slits with the same width filled in different insulators and the double slits with different width filled in same insulators. Both cases can achieve ideal splitting effects, and the biggest splitting ratio is 12. The MIM design has the advantage of simple structure, can be obtained by electron beam lithography system experiment equipment. Therefore, it has good application value.

**Key words** surface optics; surface plasmon polaritons; splitter; FDTD method; MIM structure; subwavelength

**OCIS codes** 230.3990; 240.6680; 250.5403

## 1 引言

表面等离子体光学是随纳米技术发展起来的新兴学科<sup>[1]</sup>。表面等离子体(SPs)是金属与电介质交界面存在的自由电子的集体震荡行为,是一种准粒子或者激元。表面等离子体激元(SPPs)<sup>[2]</sup>是与表面等离子体相对应的一种表面电磁模式,一般将表面电磁波描述为电磁场和对应激元的耦合模式。SPPs的最大优点在于能够突破衍射极限,在金属中等离子体效应十分显著。SPPs突破衍射极限特性可以应用在金属平板超透镜<sup>[3]</sup>和表面等离子体纳米光刻<sup>[4]</sup>等众多领域。利用SPPs原理在集成光学器件应用可构造器件,如SPPs激发源、波导滤波器、分束器、光波导、传感器、调制器、光开关、耦合器等<sup>[5-11]</sup>,亦有表面等离子体激元微型偏振器<sup>[12]</sup>及其在非线性光学领域研究<sup>[13]</sup>。

近几年随着微纳加工技术的快速发展,利用金属-介质-金属(MIM)微纳结构定向激发和操控SPPs波

收稿日期: 2014-03-22; 收到修改稿日期: 2014-05-14; 网络出版日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(11347196, 61178032)、江苏省自然科学基金(BK2012548)、江南大学自主科研青年基金(JUSRP111A19)和国家大学生创新训练计划项目(201310295038)

作者简介: 王继成(1980—),男,博士,副教授,主要从事微纳光学、量子光学与信息等方面的研究。

E-mail: jcwang@jiangnan.edu.cn

传播<sup>[14]</sup>成为微纳光学研究热门问题。加州大学张翔课题组<sup>[15]</sup>提出了可以操控表面等离子波相位和振幅的金属-电介质-金属(MDM)亚波长结构。斯坦福大学 Brongersma 课题组<sup>[16]</sup>在理论及实验上提出了一种亚波长等离子体彩色分波器。SPPs原理应用在MIM结构上可以设计各种高性能、微结构的光通信元器件,具有极好的应用前景<sup>[17-21]</sup>。

利用表面等离子体理论及经典光学的干涉理论研究SPPs波在MIM双缝波导结构中的光强传播特性,设计MIM亚波长双缝结构的表面等离子分束器。利用金属与介质狭缝之间的SPPs耦合,选择双缝填充介质、狭缝宽度、结构厚度、双缝宽度等不同的结构参数实现不同波长可见光通过MIM双缝微结构后产生分光效应,从而实现表面等离子体可见光分束器的理论设计,并利用时域有限差分(FDTD)算法验证该理论设计的可行性。

## 2 MIM双缝波导结构及理论

当线偏振光入射到MIM亚波长双缝结构,将会激发产生表面等离子体波,表面等离子体波在双缝中的传播系数 $\beta$ 可以写成

$$\tanh(\sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_d} w/2) = \frac{-\epsilon_d \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_d}}, \quad (1)$$

式中 $w$ 为缝宽, $\epsilon_d$ 和 $\epsilon_m$ 分别为介质和金属的介电常数, $k_0$ 为真空中入射光波矢。SPPs波有效折射率的实部决定了SPPs的相速,虚部对相位延迟的影响很小,因此虚部在狭缝传播中可忽略,仅取有效折射率的实部来讨论,即 $N_{\text{eff}} = \text{Re}(\beta/k_0)$ 。图1描绘了两种不同波长的入射光在填充空气( $n=1$ )和介质( $n=1.52$ )的缝中传播的有效折射率随缝宽变化的关系,这里金属为Ag,两入射光波长分别为532 nm和632.8 nm,它们的介电常数 $\epsilon_m$ 分别为 $-10.24+0.39i$ 和 $-16.23+0.64i$ 。从图1中可以看出,介质不同时,相同缝宽 $w$ 所对应有效折射率不同;介质相同时,有效折射率随着缝宽 $w$ 的增加而减小。因此可以在缝宽 $w$ 相同的狭缝中填充不同介质,或者在填充介质相同的情况下,选择不同缝宽 $w$ 来控制光在两狭缝中的有效折射率。此外,狭缝中及狭缝间产生的相位差要满足经典光学干涉理论,从而实现SPPs的定向激发和光束分离。

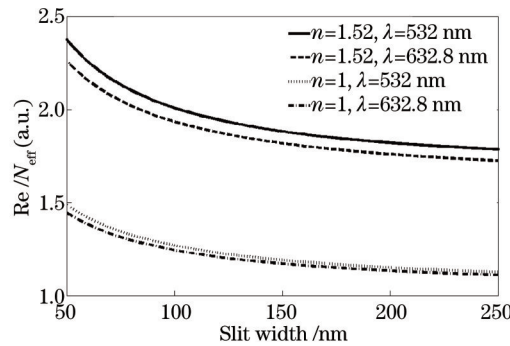


图1 有效折射率 $\text{Re}(N_{\text{eff}})$ 与狭缝宽度 $w$ 关系图

Fig.1  $\text{Re}(N_{\text{eff}})$  of slit versus its width  $w$  for two different dielectrics

图2所示是基于MIM双缝波导结构的表面等离子可见光分束器的结构示意图。当两束不同波长的入射光经过双缝后激发的SPPs波在双缝的外侧由类杨氏干涉而实现了双光束的分离。在SPPs波干涉装置中,相位差的产生由缝中和缝间两部分组成。通过调节狭缝宽度 $w$ ,双缝间距 $d$ 及狭缝中材料折射率等参数设计及优化分光器的性能。

首先考虑缝宽 $w$ 相同,填充不同介质的情况。设平面光垂直入射在双缝结构上,在两狭缝入口处的相位相同,记两狭缝出口处的相位分别为 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ ,相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (N_{\text{eff-d}} - N_{\text{eff-air}})t \frac{2\pi}{\lambda} = \Delta N_{\text{eff}} t \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2)$$

实现双光束分离需要满足如下方程组:

$$\left( \Delta N_{\text{eff-1}} \frac{2\pi}{\lambda_1} \right) t + \frac{2\pi}{\lambda_{\text{sp1}}} d = (2M_1 + 1)\pi, \quad (3)$$

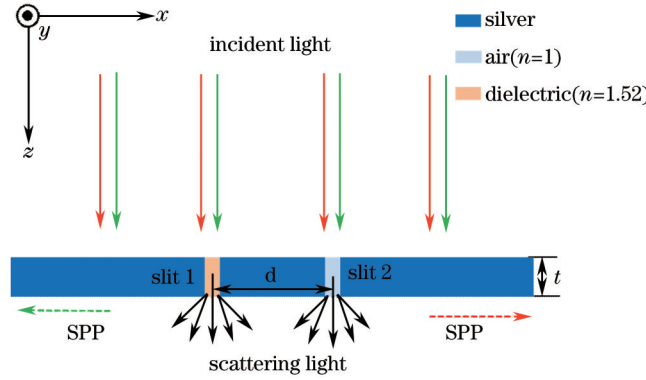


图2 基于表面等离子体效应的双分束分光器示意图

Fig.2 Schematic of double beams splitter based on surface plasmon effects

$$-\left(\Delta N_{\text{eff}-2} \frac{2\pi}{\lambda_2}\right)t + \frac{2\pi}{\lambda_{\text{sp}2}}d = (2M_2 + 1)\pi, \tag{4}$$

$$\left(\Delta N_{\text{eff}-1} \frac{2\pi}{\lambda_1}\right)t + \frac{2\pi}{\lambda_{\text{sp}1}}d \neq (2M_1' + 1)\pi, \tag{5}$$

$$\left(\Delta N_{\text{eff}-2} \frac{2\pi}{\lambda_2}\right)t + \frac{2\pi}{\lambda_{\text{sp}2}}d \neq (2M_2' + 1)\pi, \tag{6}$$

满足(3)式和(4)式可使每束光在图2所示双缝结构的两侧实现干涉相消,满足(5)式和(6)式可使在双缝结构的一侧实现消光,光束在另一侧可以通过。选择合适的参数可以使一侧消光的光束在另一侧接近或达到干涉加强。式中  $t$  为金属薄膜的厚度,  $d$  为两狭缝的间距。  $M_1'$ 、 $M_2'$  为任意整数,选取不同值将会有不同的分束效果。  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为两束入射光的波长,  $\lambda_{\text{sp}1}$  和  $\lambda_{\text{sp}2}$  分别对应于波长为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  的入射光在金属下表面所激发的等离子体的波长,由  $\lambda_{\text{sp}} = 2\pi/\text{Re}(k_{\text{sp}})$  可以计算出在金属表面传播的表面等离子体的波长  $\lambda_{\text{sp}}$ , 其中的传播常数  $k_{\text{sp}}$  可以写成

$$k_{\text{sp}} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}. \tag{7}$$

确定缝宽  $d$ 、填充介质及入射光的波长  $\lambda$ ,对(3)~(6)式求解,可以得到  $\Delta N_{\text{eff}-1}$  和  $\Delta N_{\text{eff}-2}$  值。其中(3)式和(4)式为厚度  $t$  和狭缝间距  $d$  的方程,给定任意的整数  $M_1$ 、 $M_2$ ,可以设计分束器的结构参数。将选取的银膜厚度  $t$ ,双缝间距  $d$  代入(5)式和(6)式中验证是否符合条件,通过对  $M'$  值的选取增强分束的效果。

### 3 模拟结果及理论分析

为了验证设计及理论的可行性,将理论计算的结构参数在FDTD软件中进行仿真模拟,入射光为p偏振的横磁(TM)波,选取波长为532 nm和632.8 nm的两束可见光,采用Ag作为金属膜,狭缝1和2分别填充  $n=1.52$  的介质和  $n=1$  的空气,选定狭缝的宽度  $\omega = 65$  nm,令  $M_1 = 3$  和  $M_2 = 1$ ,由(3)式和(4)式可以求出双缝间距  $d=1131$  nm 和金属Ag膜厚度  $t = 547$  nm,且  $t$  和  $d$  满足(5)式及(6)式。采用FDTD算法进行数值模拟得到的稳态磁场分布  $|H_y|^2$ ,如图3所示。因为p偏振的TM波沿只有一个磁场分量,且磁场强度与光强呈线性关系,

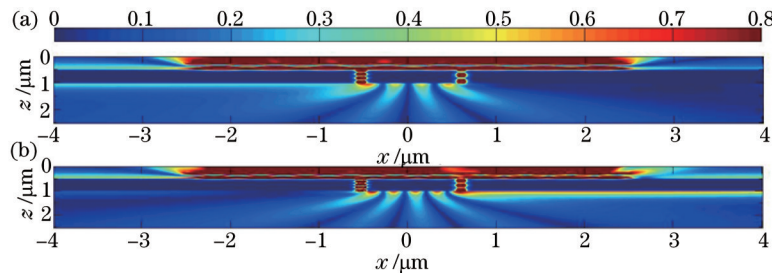


图3 可见光在金属双缝结构场分布  $|H_y|^2$ , 双缝分别填充空气 ( $n=1$ ) 和介质 ( $n=1.52$ )。 (a)  $\lambda = 532$  nm; (b)  $\lambda = 632.8$  nm  
Fig.3 Field intensity distribution  $|H_y|^2$  filled with air ( $n=1$ ) and dielectric ( $n=1.52$ ). (a)  $\lambda = 532$  nm; (b)  $\lambda = 632.8$  nm

所以给出其稳态磁场分布。从图中可以直观的看出该理论设计分束器有很明显的光分束效果,其中波长为 532 nm 的入射光向左定向激发,632.8 nm 的入射光向右定向激发。

考虑填充相同介质(空气),选取不同缝宽  $w$  的情况。此时式(3)~(6)式仍然适用。如图 4 所示,双缝填充空气,折射率  $n=1$ ,选取双缝宽  $w$  分别为 50 nm 和 200 nm。令  $M_1=3, M_2=5$ , 带入(3)~(6)式可得金属 Ag 膜厚度  $t=266$  nm, 双缝间距  $d=1343$  nm。其稳态磁场分布  $|H_y|^2$  如图 4(a) 所示,也达到了较好的分束效果,波长为 532 nm 的入射光向左定向激发且左右两侧的光强比为 2:1,632.8 nm 的入射光向右定向激发,左右两侧的光强比为 1:4。此处仅给出波长为 532 nm 和 632.8 nm 的两种可见光的分束效果。由(3)~(6)式选取合适的  $M_1$ 、 $M_2$  值、缝宽  $w$ 、厚度  $t$ 、狭缝间距  $d$  等参数,可以设计出任意波长光的分束器。

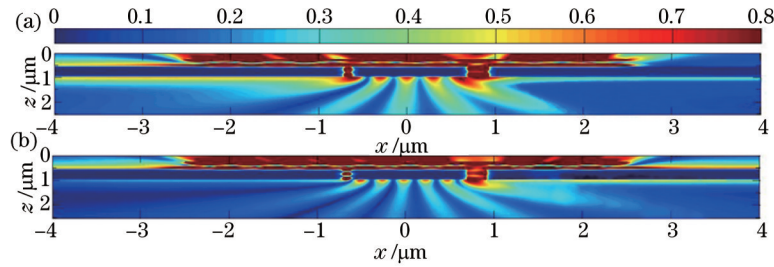


图 4 可见光在金属双缝结构场分布  $|H_y|^2$ , 双缝均填充空气 ( $n=1$ )。 (a)  $\lambda=532$  nm; (b)  $\lambda=632.8$  nm

Fig.4 Field intensity distribution  $|H_y|^2$  filled with air ( $n=1$ ) and with different wide slits,  $w=50$  nm and  $w=200$  nm, respectively. (a)  $\lambda=532$  nm; (b)  $\lambda=632.8$  nm

为了更进一步地说明该理论的可行性,充分说明单束入射光可分别实现定向激发,选取第一种双缝同宽填充不同介质的情况,在双缝的两侧分别设置相同长度的观测线  $L_1$  和  $L_2$ , 如图 5 所示,检测电磁波传播的光强  $I$ 。定义同一波长 SPPs 在狭缝两侧的分束比为  $S=I_o/I_n$ , 其中  $I_n$  为相位失配一侧的传播光强,  $I_o$  为定向激发一侧的传播光强,这里取  $L_0=400$  nm。利用 FDTD 算法对缝宽相等填充介质不同的结构进行数值模拟,在观测线  $L_1$ 、 $L_2$  上等距地取适量的点,记观测线  $L_1$  上的点到狭缝 1 的距离为  $L$ , 同样,观测线  $L_2$  上的点到狭缝 2 的距离也为  $L$ , 可以得到  $L_1$ 、 $L_2$  上相对应点的分束比  $S$  随远离双缝的距离  $L$  的变化曲线,如图 6(a) 所示。从图中可以看出波长为 532 nm 的入射光的分束比为 8~12, 波长为 632.8 nm 的入射光的分束比为 3~4, 分束效果较好。得到的最大分束比为 12。

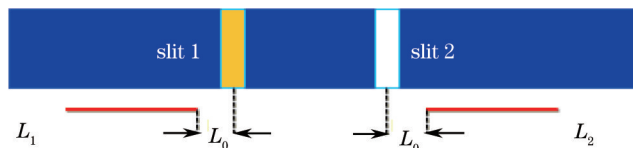


图 5 设置观测线的 SPPs 双分束分束器示意图

Fig.5 Schematic diagram of surface plasmon dichroic splitter with observation lines

图 6(b) 所示为在观测线  $L_1$ 、 $L_2$  上分别得到的不同波长强度的分束比。为了保证可见光分束的目的,双缝同侧( $L_1$  或  $L_2$ ) 相位失配的入射光产生的 SPPs 光强  $I_n$  要小于另一波长定向激发入射光产生角 SPPs 光强  $I_o$ 。虚线表示双缝左侧  $L_1$  上 632.8 nm 入射光所激发的 SPPs 的传播光强与 532 nm 入射光定向激发 SPPs 传播光强比值  $[S=I_n(632.8 \text{ nm})/I_o(532 \text{ nm})]$  随远离狭缝 1 的变化关系,可见分束比  $S$  最大不超过 0.14, 即前者相对后者可忽略不计;实线表示双缝右侧  $L_2$  上 532 nm 入射光所激发的 SPPs 的传播光强与 632.8 nm 入射光定向激发 SPPs 传播光强比值  $[S=I_n(532 \text{ nm})/I_o(632.8 \text{ nm})]$  随远离狭缝 2 的变化关系,最大分束比  $S$  也不超过 0.14, 前者相对后者可忽略不计。综合上述分析,该 SPPs 双缝波导结构可较好地实现可见光分束的效果。

## 4 结 论

利用表面等离子体和经典光学的双缝干涉理论设计了基于 MIM 双缝波导结构的彩色分束器。基于上述理论,通过填充不同介质,设置波导结构双缝宽度、波导厚度等参数可使设计的分束器达到不同效果。采用 FDTD 算法数值模拟了入射光为 532 nm 和 632.8 nm 两种可见光的分光器分束效果。从光强比可以看出两分束器均有很好的分束效应,最大分束比可达 12。此外,验证了一对较为常用的可见光的分束效果,理论

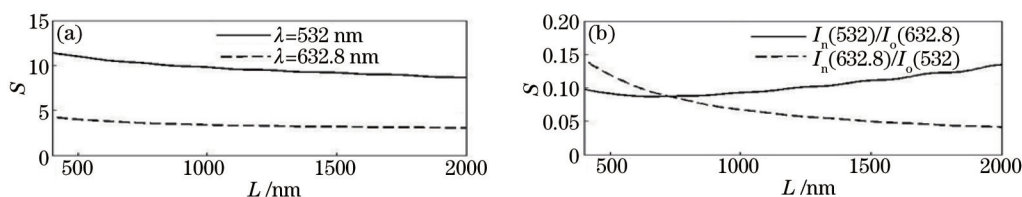


图6 (a) 相同波长和(b)不同波长SPPs的分束比 $S$ 与观察线上点到同侧狭缝中心距离 $L$ 的变化关系

Fig.6 (a) Relationship between splitting ratio  $S$  of (a) the same wavelength and different wavelengths versus distance of the point of observation line to the same side slit centre  $L$

上选择狭缝宽度  $w$ , 双缝间距  $d$ , 狭缝中材料折射率等合适参数, 可以设计任意波长的分束器。对双缝波导结构的分束效果进行了模拟计算及分析。该理论设计结构简单, 可以通过电子束刻蚀系统等实验设备加工, 具有较好的应用前景。

### 参考文献

- 1 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- 2 Raether H. Surface Plasmons: on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 4-16.
- 3 Fang N, Liu Z L, Yen T J, *et al.*. Regenerating evanescent waves from a silver superlens[J]. Opt Express, 2003, 11(7): 682-687.
- 4 Luo X, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(23): 4780-4782.
- 5 Wang B, Wang G P. Simulations of nanoscale interferometer and array focusing by metal heterowaveguides[J]. Opt Express, 2005, 13(26): 10558-10563.
- 6 Pile D F P, Ogawa T, Gramotnev D, *et al.*. Two-dimensionally localized modes of a nanoscale gap plasmon waveguide [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(26): 261114.
- 7 Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, *et al.*. Channel plasmon-polariton guiding by subwavelength metal grooves[J]. Phys Rev Lett, 2005, 95(4): 046802.
- 8 Wang J, Wang Y, Zhang X, *et al.*. Splitting and unidirectional excitation of surface plasmon polaritons by two uniform metallic nanoslits with a nanocavity antenna[J]. Journal of Modern Optics, 2010, 57(17): 1630-1634.
- 9 Wang Y, Wang J, Gao S, *et al.*. Two-way directional plasmonic excitation with two unsymmetrical metallic slits[J]. Appl Phys Express, 2013, 6(2): 022003.
- 10 Li Juan, Wang Bingyan, Xue Wenrui. Propagation properties of Y-splitters based on MIM surface plasmonic waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0124002.  
李娟, 王冰艳, 薛文瑞. 基于MIM型表面等离子体光波导的Y形分束器的传输特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0124002.
- 11 Li Zhiquan, Gao Xiaoguang, Niu Liyong, *et al.*. Propagation properties of a surface plasmon polariton directional coupler[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1010001.  
李志全, 高晓光, 牛力勇, 等. 一种表面等离子体激元定向耦合器的传输特性[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1010001.
- 12 Yu Jie, Zhang Junxi, Zhang Lide, *et al.*. Surface plasmonic micropolarizers based on Ag nanorod arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0723001.  
于杰, 张俊喜, 张立德, 等. 基于Ag纳米棒阵列的表面等离子激元微型偏振器[J]. 光子学报, 2014, 34(7): 0723001.
- 13 Ren Mengxin, Xu Jingjun. Surface plasmon polariton enhanced nonlinearity and applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080002.  
任梦昕, 许京军. 表面等离子体激元增强非线性的原理及应用[J]. 激光与光电学进展, 2013, 50(8): 080002.
- 14 Chen Quansheng, Tong Yuying, Zhuang Yuan, *et al.*. Unidirectional excitation of surface plasmon based on metallic slit-groove structure[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0510001.  
陈全胜, 佟玉莹, 庄园, 等. 基于金属狭缝-凹槽结构单向激发表面等离子体[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0510001.
- 15 Lerosey G, Pile D F P, Matheu P, *et al.*. Controlling the phase and amplitude of plasmon sources at a subwavelength scale[J]. Nano Letters, 2009, 9(1): 327-331.
- 16 Liu J S Q, Pala R A, Afshinmanesh F, *et al.*. A submicron plasmonic dichroic splitter[J]. Nature Communications, 2011,

- 2: 1-6.
- 17 Xu T, Zhao Y, Gan D, *et al.*. Directional excitation of surface plasmons with subwavelength slits[J]. Appl Phys Letters, 2008, 92(10): 101501.
- 18 Lin X, Huang X. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometeric sizes[J]. Opt Lett, 2008, 33(23): 2874-2876.
- 19 Hu H, Zeng X, Wang L, *et al.*. Surface plasmon coupling efficiency from nanoslit apertures to metal-insulator-metal waveguides[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(12): 121112.
- 20 Zhang X, Li Z, Chen J, *et al.*. A dichroic surface-plasmon-polariton splitter based on an asymmetric T-shape nanoslit [J]. Opt Express, 2013, 21(12): 14548-14554.
- 21 Wang B, Wu X, Zhang Y. Multiple-wavelength focusing and demultiplexing plasmonic lens based on asymmetric nanoslit arrays[J]. Plasmonics, 2013, 8(4): 1535-1541.