

基于非对称单缝结构的表面等离子体定向激发

胡 玄¹ 刘会刚¹ 刘 波^{1,2}

¹南开大学电子信息与光学工程学院天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350

²南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350

摘要 表面等离子体的定向激发在光通信、生物传感、集成电路、纳米刻蚀等领域具有重要应用。提出了一种 L 型非对称单缝的表面等离子体定向激发结构。无须改变缝隙的结构参数,通过调节入射光的入射角度即可实现表面等离子体的单向和双向激发,起到全光开关调制的作用。详细阐述了 L 型缝隙的加工制作流程,利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对缝隙结构进行模拟仿真。仿真结果表明,非对称单缝结构可实现消光比在 -16 dB~ 15 dB 范围内连续可调的表面等离子体定向激发。该结构体积小,便于操控,易于加工,对微纳等离子体光学器件的研究具有指导意义。

关键词 表面光学; 表面等离子体; 定向激发; 角度调制; 有限元分析法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1113001

Directional Excitation of Surface Plasmons Based on Asymmetric Single-slit Structure

Hu Xuan¹ Liu Huigang¹ Liu Bo^{1,2}

¹Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China

²Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China

Abstract The directional excitation of surface plasmons play an important role in optical communication, biosensing, integrated circuit and nanolithography, etc. An asymmetric L-type single-slit structure which can excite surface plasmons directionally is proposed. Without changing structural parameters of the slit, both the unidirectional and the bidirectional excitations of surface plasmons can be realized by changing the incidence angle. The structure can also play a role in all-optical switch modulation. The machining process of the L-type single-slit is elaborated in detail. The slit structure is simulated by the COMSOL Multiphysics software. The results show that the asymmetric single-slit structure can realize the directional excitation of surface plasmons with a continuously adjustable extinction ratio from -16 dB to 15 dB. This single-slit structure occupies small area and is convenient for manipulation and machining, and it has guiding significance for the research on micro-nano plasmon optical devices.

Key words optics at surfaces; surface plasmons; directional excitation; angle modulation; finite element method

OCIS codes 240.6680; 240.6690; 250.5403

1 引 言

表面等离子体是一种由电磁波与电子耦合产生并沿着金属和介质构成的界面传播的电磁振荡波^[1-2]。基于强场束缚和增强效应,表面等离子体在光学波导、生物传感、纳米刻蚀以及光集成电路等方面具有广阔

收稿日期: 2016-07-13; 收到修改稿日期: 2016-08-22

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划(201510055051)

作者简介: 胡 玄(1995—),男,本科生,主要从事表面等离子体光学方面的研究。E-mail: 1310317@nankai.edu.cn

导师简介: 刘会刚(1980—),男,博士,副教授,主要从事表面等离子体光学和超表面方面的研究。

E-mail: liuhg@nankai.edu.cn (通信联系人)

的应用前景^[3-11]。为发展等离子体技术并实现表面等离子体器件在更多领域的应用,需要控制表面等离子体的激发强度和传播方向。由于波矢的不匹配,表面等离子体不能由光照入射直接激发,必须通过特殊的结构补偿波矢才能实现。如何设计微结构,将自由空间光高效耦合为表面等离子体并使其沿金属表面向特定方向或区域传播成为当前的研究热点。

Devau 等^[12]在厚金属薄膜上加工亚波长金属微阵列,成功激发了表面等离子体。López-Tejeira 等^[13]在金属薄膜的一侧加工周期性金属凹槽阵列,通过入射光背入射的方法实现了表面等离子体的定向激发。Xu 等^[14]运用金属光栅结构,通过改变狭缝处的折射率,并根据光的干涉原理,实现了表面等离子体的干涉相消和干涉相长,成功控制了表面等离子体的激发方向。Lerosey 等^[15]利用金属镜结构实现了表面等离子体相位和振幅的调控。He 等^[7]设计了一种由狭缝和凸起组成的表面等离子体耦合器,运用光的干涉原理成功解释了其原理。Wang 等^[16]提出了一种由两层金属薄膜构成的可调节的表面等离子体激发源。Chen 等^[17]设计了一种非对称的双缝结构,成功实现了具有超宽带特性且消光比可达 35 dB 的表面等离子体激发源。Lin 等^[11]通过改变入射光的极化方向,成功实现了表面等离子体的双向和单向激发。Chen 等^[18-19]提出了一种全光开关,无须改变结构参数,仅改变入射光的频率即可实现表面等离子体沿不同方向的传播。

传统的表面等离子体定向激发结构的激发源结构参数一旦确定,表面等离子体的传播方向便不可改变。如果想改变传播方向,须重新设计新的激发结构。激发结构一旦加工完毕,便无法再改变表面等离子体的传播方向,这为微纳金属结构光学器件的集成带来一定的困难。

改变输入光的极化方向可以实现表面等离子体沿不同方向的传播,但其结构设计难度大,加工工艺复杂,光路也相对复杂^[11]。改变入射光的频率也可以实现表面等离子体沿不同方向的传播^[18-19],但改变入射光的频率需要不同的光源,不利于设计光集成器件。在实际操作中,重新加工结构以及改变光源极化方向和光源频率都不易操作,入射光角度的改变则相对容易实现。

本文提出了一种用于实现表面等离子体定向激发的单缝结构。无须改变缝隙结构的物理参数和入射光波长,仅改变入射光的入射角度,即可实现表面等离子体的单向或双向激发。结合当前的纳米加工技术,阐述了该结构的加工流程。仿真结果表明,单缝激发的表面等离子体的消光比在 -16 dB~15 dB 范围内连续可调。该单缝结构占用面积小,易于集成,对光子器件的加工与集成具有一定的参考价值。

2 非对称单缝的表面等离子体定向激发

通常情况下,利用光的干涉可实现表面等离子体沿特定方向的传播。被激发的表面等离子体经过一定距离的传播后产生相位延迟,一端实现光的干涉相长,另一端实现光的干涉相消,从而实现表面等离子体的定向传播。使用单缝结构激发表面等离子体,通常采用带有挡板的表面等离子体单缝激发源。如图1(a)所示,该结构由单缝和一块挡板组成。入射光通过单缝后向两个方向传播,向右传播的波遇到挡板发生反射,与本来向左传播的波发生干涉。挡板的宽度 $w_1 = 500$ nm,高度 $h_1 = 500$ nm;狭缝的宽度 $w_2 = 500$ nm,高度 $h_2 = 500$ nm。挡板和金属单缝由金(Au)加工而成,当横磁(TM)模式的入射光的波长为 830 nm 时,金属的介电常数 $\epsilon_m = -26.61 + 1.665i$ 。为更好地描述狭缝处激发的表面等离子体相位的变化,狭缝中央到金属挡板左边缘的距离 l 可表示为

$$l = d + (w_2/2), \quad (1)$$

式中 d 为狭缝右端到金属挡板之间的距离。由入射光激发的沿着 Au 和空气表面传播的表面等离子体波波数 k_{sp} 可表示为^[2]

$$k_{sp} = \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} k_0, \quad (2)$$

式中 ϵ_d 为挡板的介电常数, $\epsilon_d = 1$; k_0 为电磁波在真空中传播时的波矢。

经狭缝激发的向右传播的表面等离子体经过长度为 l 的传播距离后的相位变化为 $k_{sp}l$,被挡板反射后回传至狭缝时的相位变化也为 $k_{sp}l$,因此经挡板反射后向左传播的表面等离子体与原先向左传播的表面等离子体在狭缝中央处的总相位差 Φ 可以表示为^[7]

$$\Phi = 2k_{sp}l + \Delta\varphi, \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为表面等离子体传播至挡板处发生反射所产生的相差。

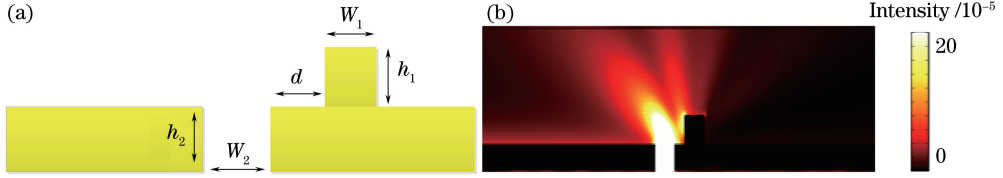


图 1 (a) 非对称单缝结构示意图; (b) $d=250$ nm 时表面等离子体的能流密度分布图

Fig. 1 (a) Diagram of asymmetric single-slit structure; (b) distribution of energy flow density of surface plasmons ($d=250$ nm)

由(1)、(2)式可知,向左传播的表面等离子体的相位差 Φ 随着 d 的变化发生周期性变化。从狭缝激发的表面等离子体向左右两个方向传播,向右传播的表面等离子体波几乎全部被挡板反射。当向左传播的表面等离子体的相位差满足

$$\Phi = 2m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

$$\Phi = (2m + 1)\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

时,可分别实现干涉相长和干涉相消。当 Φ 为 π 的偶数倍时,可实现表面等离子体沿左方向的定向激发。扫描 d 参数,同时测量距离狭缝左端 5 个波长处的磁场强度,结果如图 2 所示。磁场强度随 d 的增加呈周期性变化,周期略大于 400 nm。两个相邻的实现干涉相长或干涉相消的 d 值之差可表示为

$$\Delta d = \frac{\pi}{k_0} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}}. \quad (6)$$

计算得到 Δd 约为 407 nm,该结果与(1)式的结论一致,即可通过调节 d 的数值操控向左传播的表面等离子体的强度,实现表面等离子体的单向传播。

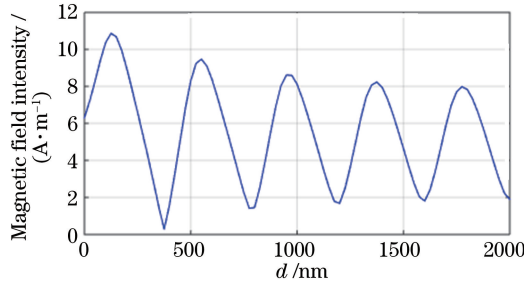


图 2 磁场强度随 d 变化的曲线图

Fig. 2 Relationship between d and magnetic field intensity

3 L 型非对称单缝的表面等离子体定向激发

第 2 节所述的单缝结构可实现表面等离子体的定向激发,但挡板相对于狭缝的位置使得该结构无法完成表面等离子体向其他方向的传播。为了使激发的表面等离子体沿不同方向传播,改进上述结构,移动挡板的位置,提出 L 型单缝等离子体激发结构。通过改变单缝本身的对称性,实现等离子体的单向和双向传播。

图 3 为 Au 和二氧化硅 (SiO_2) 构成的 L 型非对称单缝结构。上槽的宽度 $d_1 = 500$ nm,高度 $t_1 = 250$ nm,下槽的宽度 $d_2 = 1000$ nm, $t_2 = 250$ nm。光从下端口入射,在上端口形成的表面等离子体沿着金属表面与介质(空气)的交界面传播。狭缝和入射源的介质均为 SiO_2 ,折射率为 1.5。TM 模式的入射波波长仍为 830 nm,功率为 1 W。

使用商业软件 COMSOL Multiphysics 4.4 的射频模块对该 L 型单缝结构进行仿真。仿真域的尺寸为 $10000 \text{ nm} \times 5000 \text{ nm}$,完美匹配层作为边界吸收背散射波。为确保仿真计算的正确性,最小的网格尺寸设为 5 nm,并对槽口处的网格进行局部加密。从实际应用考虑,大的入射角 ($|\theta| > \pi/3$) 产生大的照射面积^[20],不利于实验验证和在纳米光学领域的应用,因此仅研究入射角 $|\theta| \leq \pi/3$ 的情况。一般情况下,表面等离子体

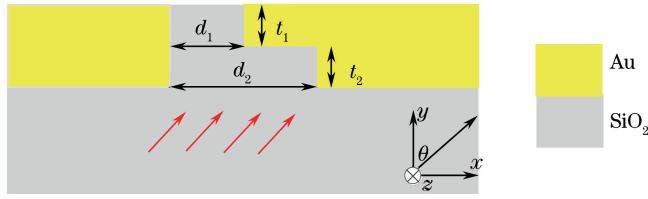


图 3 L 型非对称单缝结构示意图

Fig. 3 Diagram of asymmetric L-type single-slit structure

的色散曲线总是在光锥线的右侧,相同频率下,表面等离子体的波矢量比平面光波矢量大,所以无法直接使用平面光波激发表面等离子体。当电磁波垂直入射时,由于 L 型单缝结构的不对称性,更多的能量聚集于 L 型狭缝左侧,同时产生向左右两个方向传播的不相等的波矢分量^[8]。改变光的入射角度,调控通过狭缝散射产生的波矢分量,可实现表面等离子体的定向激发。

固定单缝结构的参数,对入射角范围为 $-\pi/3 \sim \pi/3$ 的入射电磁波进行参数扫描(设沿 x 轴正方向的入射角度为正)。通过测量距离单缝左右两端 5 个波长处的能流密度表征所激发的表面等离子体的强度。图 4(a) 为 $d_1 = 500 \text{ nm}$ 时向左右两端传播的表面等离子体的能流密度与入射角度的关系,绿色实线代表向右传播的表面等离子体的能流密度 I_R ,蓝色虚线代表向左传播的表面等离子体的能流密度 I_L 。为更直观地体现向两个方向传播的表面等离子体的相对强度,使用消光比表征表面等离子体传播的方向性。消光比的计算公式为

$$\eta = 10 \lg(I_L/I_R) \quad (7)$$

当消光比远大于 0 时,表面等离子体向左传播;当消光比远小于 0 时,表面等离子体向右传播;当消光比接近或等于 0 时,向左右两端激发的表面等离子体的强度几乎相等。图 4(b) 为 $d_1 = 500 \text{ nm}$ 时消光比与入射角度的关系,可以看出消光比的强度随角度变大先增强后减弱。当电磁波以接近垂直方向或负角度入射时,表面等离子体向左传播;当电磁波以较大的正角度入射时,表面等离子体保持向右的定向传播。当入射角为 $-\pi/12$ 时,消光比为极大值(15 dB);当入射角为 $\pi/6$ 时,消光比为极小值(-16 dB)。图 5 为表面等离子体在不同入射角下的能流密度分布图。当入射角为 $-\pi/3$ 时,表面等离子体同时沿着左右两个方向传播,强度几乎相等;当入射角为 $-\pi/12$ 时,表面等离子体几乎完全向左传播;当入射角为 $\pi/6$ 时,表面等离子体几乎完全向右传播。与传统的表面等离子体单向激发结构相比,该结构只须改变入射光的角度,即可实现表面等离子体沿不同方向传播。

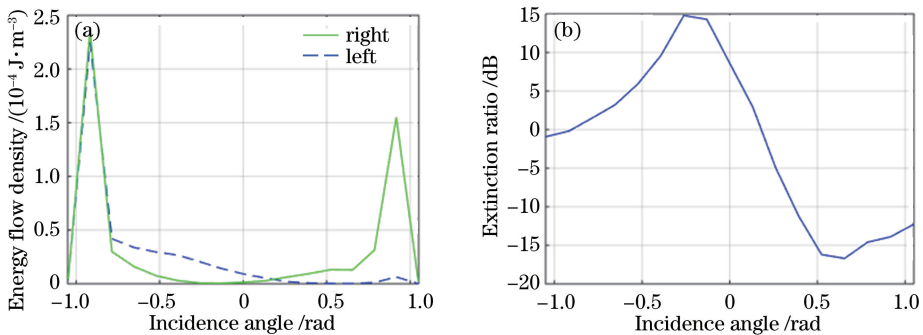


图 4 (a) $d_1 = 500 \text{ nm}$ 时向左右两端传播的表面等离子体的能流密度与入射角度的关系;

(b) $d_1 = 500 \text{ nm}$ 时消光比与入射角度的关系

Fig. 4 (a) Relationship between incidence angle and energy flow density of surface plasmons propagating to left and right ($d_1 = 500 \text{ nm}$); (b) relationship between extinction ratio and incidence angle ($d_1 = 500 \text{ nm}$)

调节上槽和下槽宽度,观察单缝的结构参数对表面等离子体传播的影响。保持 $d_2 = 1000 \text{ nm}$ 不变,在 $200 \sim 800 \text{ nm}$ 范围内对 d_1 进行扫描,步长为 20 nm 。图 6 中实线代表向右传播的表面等离子体的能流密度,虚线代表向左传播的表面等离子体的能流密度。当入射光垂直入射时,随着 d_1 的变化,消光比的变化范围为 $-8 \text{ dB} \sim 9 \text{ dB}$ 。当入射光的入射角为 $\pi/4$,向右传播的表面等离子体强度几乎一直大于向左传播的



图 5 不同入射角度下的能流密度分布图。(a) $-\pi/3$; (b) $-\pi/12$; (c) $\pi/6$

Fig. 5 Distributions of energy flow density under different incidence angles. (a) $-\pi/3$; (b) $-\pi/12$; (c) $\pi/6$

表面等离子体强度,消光比的变化范围为 0 dB ~ -16 dB。当 $d_1 = 480$ nm 时,消光比达到极小值 (-16 dB),表面等离子体几乎完全向右传播。当入射光的入射角为 $-\pi/4$,受 d_1 的影响较大,消光比的范围为 -21 dB ~ 14 dB。当 $d_1 = 380$ nm 时,消光比达到极大值 (14 dB),表面等离子体向左传播;当 $d_1 = 600$ nm 时,消光比达到极小值 (-21 dB),表面等离子体向右传播。尽管在 $d_1 = 600$ nm 时可最大化实现表面等离子体的单向传播,但在 3 个不同的入射角度下,该结构的消光比始终小于 0,即在该尺寸下无法通过改变光的入射角度实现表面等离子体向不同方向的传播。当 $d_1 = 400$ nm 时,在不同的入射角度下表面等离子体的消光比分别为 0 dB、-10 dB、10 dB,即可通过调节入射角度来实现表面等离子体向不同方向的传播,但效果不如 $d_1 = 500$ nm 时好。

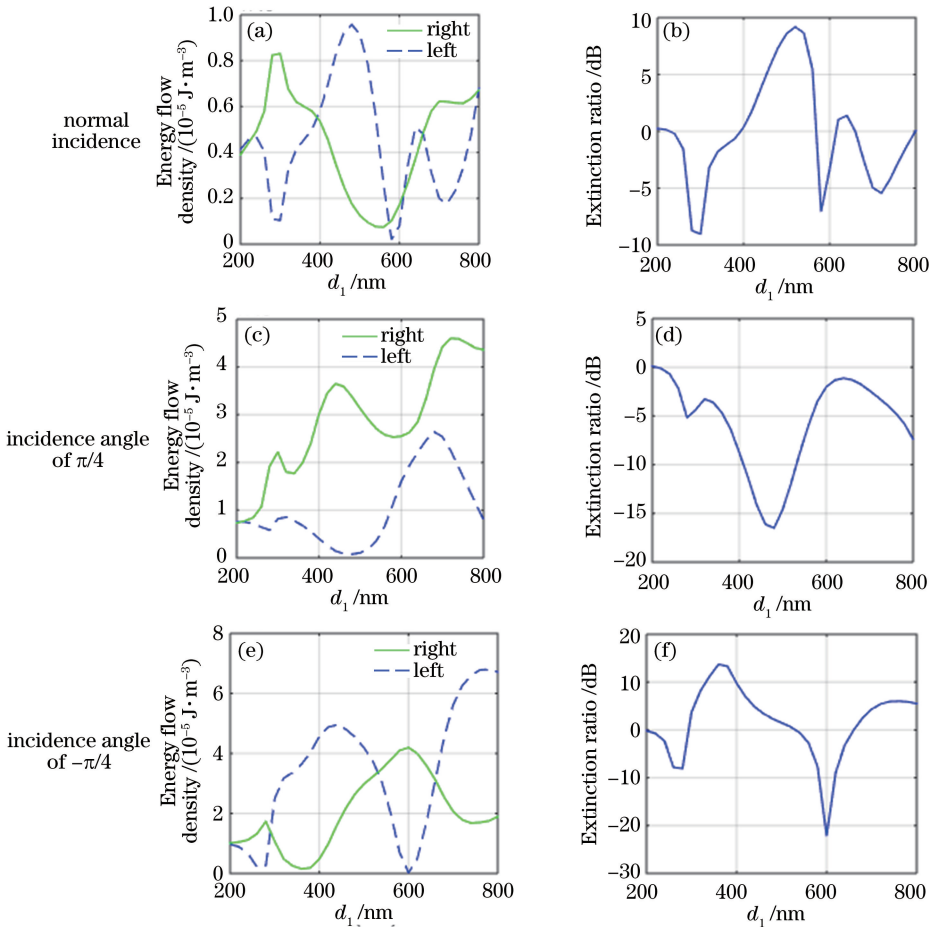


图 6 (a)(c)(e) 能流密度随 d_1 的变化; (b)(d)(f) 消光比随 d_1 的变化

Fig. 6 (a)(c)(e) Relationship between energy flow density and d_1 ; (b)(d)(f) relationship between extinction ratio and d_1

4 L 型非对称单缝的加工工艺流程

随着纳米加工工艺的发展,可以利用电子束光刻和聚焦离子束等手段实现 L 型非对称单缝结构。非对称单缝结构的加工工艺流程如图 7 所示。在 SiO_2 衬底上旋涂一层光刻胶并前烘[图 7(a)];在对应的掩模板下经曝光、显影、清洗等流程去除两侧光刻胶并使中间保留部分的光刻胶长度为 1000 nm,在无光刻胶的

部分刻蚀掉厚度为 500 nm 的 SiO₂[图 7(b)];除掉光刻胶[图 7(c)];再次旋涂一层较厚的光刻胶[图 7(d)];在与之对应的掩模板下曝光,去除指定位置的光刻胶,在无光刻胶的部分刻蚀掉厚度为 250 nm 的 SiO₂[图 7(e)];去除光刻胶[图 7(f)];溅射一层 Au 膜[图 7(g)];对 Au 膜表面进行抛光,去除顶层部分 Au 膜至 SiO₂层[图 7(h)]。

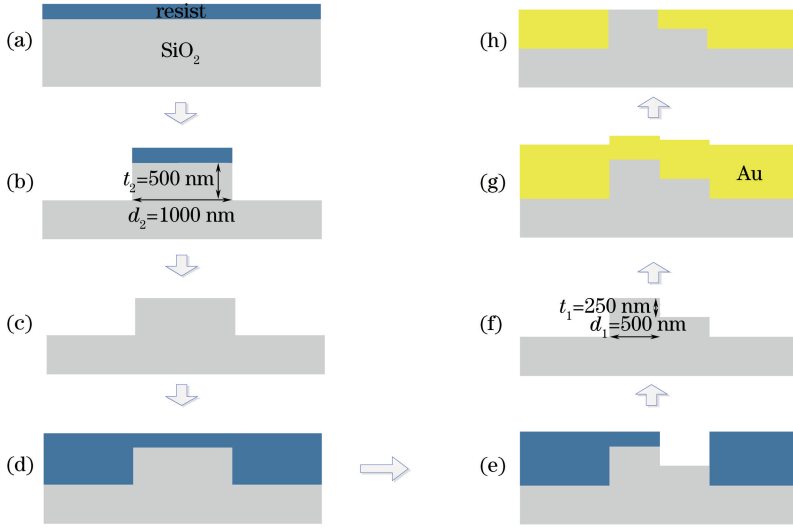


图 7 L 型非对称单缝结构的加工工艺流程

Fig. 7 Machining process of asymmetric L-type single-slit structure

5 结 论

提出一种 L 型单缝表面等离子体定向激发结构,无须改变结构参数,仅通过调节入射光的入射角度即可实现表面等离子体向左、向右和双向传播。利用单缝激发表面等离子体的原理,通过调控入射光的入射角度实现表面等离子体的单向和双向传播,并阐述了具体加工该模型的流程。利用基于有限元方法的模拟软件 COMSOL Multiphysics 进行数值仿真,研究表面等离子体在不同结构参数、不同入射角度时的传播情况,通过改变入射角度调节表面等离子体的激发。当 $d_1=500$ nm、入射角为 $-\pi/3$ 时,可实现表面等离子体双向传播;当入射角为 $-\pi/12$ 时,可实现表面等离子体左向传播;当入射角为 $\pi/6$ 时,可实现表面等离子体右向传播。仿真结果表明,与传统的表面等离子体激发结构相比,提出的单缝结构可实现消光比在 -16 dB~ 15 dB 范围内的连续可调,并且该结构所占面积小,便于加工,对于光电子器件的集成化具有重要意义。

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, Alain D, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- 3 Fu Y L, Hu X Y, Lu C C, *et al.* All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides[J]. Nano Letters, 2012, 12(11): 5784-5790.
- 4 Skorobogatiy M, Kabashin A V. Photon crystal waveguide-based surface plasmon resonance biosensor [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(14): 143518.
- 5 Zhang Zhe, Liu Qian, Qi Zhimei. Study of Au-Ag alloy film based infrared surface plasmon resonance sensors[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 060703.
张 喆, 柳 倩, 祁志美. 基于金银合金薄膜的近红外表面等离子体共振传感器研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(6): 060703.
- 6 Chen Z, Hu R, Cui L N, *et al.* Plasmonic wavelength demultiplexers based on tunable Fano resonance in coupled-resonator systems[J]. Optics Communications, 2014, 320(2): 6-11.

- 7 He M D, Gong Z Q, Li S, *et al.* Plasmonic coupler based on the nanoslit with bump[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 368-372.
- 8 Li D D, Zhang D H, Yan C C, *et al.* Directional surface plasmon-polariton excitation by a compact slot partially filled with dielectric[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5949-5956.
- 9 Xiong Zhicheng, Zhu Lilin, Liu Cheng, *et al.* High-intensity directional surface plasmonic excitation based on the multi metallic slits with nano-antenna[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64 (24): 247301.
熊志成, 朱丽霖, 刘 诚, 等. 基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 247301.
- 10 Liu D L, Li K, Ho C C, *et al.* Compact surface-plasmon-polariton dichroic splitter with high splitting ratio based on three cascaded grooves[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(6): 1125-1131.
- 11 Lin J, Mueller J P, Wang Q, *et al.* Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons[J]. *Science*, 2013, 340(6130): 331-334.
- 12 Devaux E, Ebbesen T W, Weeber J, *et al.* Launching and decoupling surface plasmons via micro-gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(24): 4936-4938.
- 13 López-Tejiera F, Rodrigo S G, Martín-Moreno L, *et al.* Efficient directional nanoslit couplers for surface plasmons[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(5): 324-328.
- 14 Xu T, Zhao Y, Gan D, *et al.* Directional excitation of surface plasmons with subwavelength slits[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10): 101501.
- 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 Wang Y K, Zhang X R, Tang H J, *et al.* A tunable directional surface plasmon polaritons source[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20457-20464.
- 17 Chen J J, Sun C W, Li H Y, *et al.* Ultra-broadband directional launching of surface plasmon polaritons by a double-slit structure beyond the diffraction limit[J]. *Nanoscale*, 2014, 6: 13487-13493.
- 18 Chen J J, Li Z, Zhang X, *et al.* Submicron bidirectional all-optical plasmonic switches[J]. *Scientific Reports*, 2012, 3: 1451.
- 19 Chen J J, Li Z, Yue S, *et al.* Highly efficient all-optical control of surface-plasmon-polariton generation based on a compact asymmetric single slit[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(7): 2933-2937.
- 20 Xia N, Yang Y Q, Li Q, *et al.* Tunable directional long-range surface plasmon polaritons launching based on nanoslits [C]. *SPIE*, 2015, 9673: 96730W.