

激光与光电子学进展

金属纳米狭缝阵列的表面等离子极化激元 弯曲光束传输调控

张涛, 张坤, 沙冬峰, 李辉*

昆明学院物理科学与技术学院, 云南 昆明 650214

摘要 表面等离子激元弯曲光束(SPB)作为一种局域在金属表面传输的特殊光束,在光子操控和光学捕获等方面有着特殊的应用潜力。应用相位匹配法,设计了几种金属纳米狭缝阵列(V形、N形、M形及M+V形)结构,调控产生了SPB;讨论了入射光波偏振角度和结构参数对SPB电场强度的调控影响。以M形结构为例,讨论了结构臂之间的夹角、结构参数及结构间的耦合对SPB的影响。结果表明:不同结构产生的SPB电场强度随入射光波偏振角度的变化满足正弦函数分布;SPB电场强度分布受到结构臂之间的夹角、结构参数及结构间的耦合影响。用偶极子远场辐射强度和辐射角度满足的规律对结果进行了定性分析,为SPB产生器的设计和优化提供了指导。

关键词 表面光学; 光场调控; 表面等离子极化激元; 弯曲光束

中图分类号 O439 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP202158.1724002

Manipulating Surface Plasmonic Bending Beams in Metal Nanoslit Arrays

Zhang Tao, Zhang Kun, Sha Dongfeng, Li Hui*

School of Physical Science and Technology, Kunming University, Kunming, Yunnan 650214, China

Abstract Surface plasmonic bending beams (SPB) are optical beams that propagate locally on metal surfaces, thus showing special application potential in photon manipulation and optical capture. Using phase matching method, various metal nanoslit arrays, including V-, N-, M-, and M+V-shaped arrays, are designed to generate the SPB. In addition, the effects of the polarization angle and structural parameters of the incident light wave on the regulation of SPB electric-field intensity are discussed. Considering the M-shaped array as a representative example, the relations between the angle of the structural arms and structural parameters and coupling between the structures on SPB are discussed. The results show that the variation in the SPB electric-field intensity generated by different structures according to the polarization angle of the incident light wave follows a sinusoidal function distribution. In addition, the SPB electric-field intensity distribution is affected by the angle between the structural arms and structural parameters and the coupling between the structures. Qualitative analyses using far-field radiation intensity of the dipole and the law of radiation angle provide guidelines for the design and optimization of SPB generators.

Key words optics at surfaces; manipulating of optical field; surface plasmon polariton; bending beam

OCIS codes 240.6700; 240.6680

收稿日期: 2020-12-19; 修回日期: 2020-12-30; 录用日期: 2021-01-07

基金项目: 云南省科技厅联合专项面上项目[2019FH001(-081)], 云南省教育厅科研项目(2020J0514)、昆明学院引进人才项目(YJL2006)

通信作者: *Huili009@126.com

1 引言

表面等离子极化激元(SPPs)是在外加电磁场的作用下,金属表面的自由电子集体振荡产生的沿金属表面传输的电子疏密波^[1]。作为一种特殊的电磁波,在传输过程中,它能突破光学衍射极限,在光子领域有着重要的应用^[2-4]。对 SPPs 场的传输和辐射进行调控,可以产生沿着设计好的特殊弯曲曲线传输的表面等离子极化激元弯曲光束(SPB)。SPB 的传播路径是可控的,具有任意弯曲特性,在光子操控和光学捕获等方面有着特殊的应用潜力。

近几年来,研究者主要通过引入新材料、提出新设计、提出新物理模型等各种手段提高 SPPs 场调控的深度(如提高调控的效率和宽带)、扩展 SPPs 场调控的维度(如偏振、相位、振幅、频率、时域及空域等)、实现多功能光学集成^[4-7]等。例如,研究者在金属薄膜上制备弧形圆孔阵列^[8-9]、圆形光栅^[10]、破缺的弧形栅栏^[11]、阿基米德螺旋线等人工微结构^[12],通过结构的小单元激发辐射 SPPs 波,它们叠加形成聚焦 SPPs 束。研究者在金属膜上制备平行光栅激发 SPPs,经放置于光栅旁的矩形块、圆形、弧形及小孔等不同电介质块阵列,得到了不同的有效折射率,改变了 SPPs 场的传输相位,重新干涉叠加形成聚焦 SPB^[13-14]。研究者用圆形排布的垂直缝阵列、三角形纳米天线、F 形纳米缝、其他特殊排布的纳米缝阵列等偏振响应结构实现了动态的聚焦 SPPs 束^[14-20]。研究者通过有一定夹角的对称平面光栅^[17]、谷粒形、交叉光栅等全息结构^[21-22],小孔阵列及聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)半球^[23-25]等多种结构调控产生准直 SPB。另外,研究者应用焦散线原理反演了相位,设计了计算机全息光栅耦合结构,实现了大角度非旁轴的弯曲 SPPs 束,包括沿着 m 次方曲线、指数曲线传播的弯曲 SPPs 束,Mathieu SPPs 束,Weber SPPs 束^[26]。研究者设计了双排纳米缝阵列、弧形 PMMA、孔洞、三角形、V 形、D 形及 C 形等各种偏振态响应结构阵列^[27-42],实现了各种可以任意弯曲的 SPB 等。综上所述,关于利用各种人工微结构调控产生各种特殊 SPB 的研究取得了丰富的成果。但是,仍存在 SPB 和结构一一对应;调控手段较单一,基本都是通过结构参数对 SPPs 场相位和振幅进行调节来实现多种调控手段;动态调制这些 SPB 时需要重新制备结构,极其不方便等不足。

后来也有研究者开始关注通过改变入射光波的偏振特性来实现对 SPPs 场的调控的方面。例如,研究者用圆偏光照射平行光栅,在金属表面产生分叉形的 SPB,且通过改变圆偏光的拓扑态指数动态调节了分叉形 SPB 的分叉角度^[43];另外,也有研究者通过对光的自旋态和拓扑荷数等光学参数进行灵活调控实现了各种特殊 SPPs 场^[44]。Li 等^[45]设计了圆孔阵列,同时调控产生了多条 SPB,且通过改变入射光波的偏振角度,对多条 SPB 的电场强度进行了动态调制。这些实验结果表明:利用入射光波偏振特性可以调制产生 SPB,但是物理机制不够完善,尤其是入射光波偏振特性、产生的 SPB 及结构相互之间的作用机制不够明确。2019 年, Li 等^[46]设计了臂之间夹角为 90° 的 M 形结构,讨论了入射光波偏振角度和产生 SPB 电场强度的相互作用规律,且发现在入射光波偏振角度为 45° 和 135° 时,实现了 SPB 的反转。但是, M 形结构臂之间夹角为其他非 90° 时,入射光波偏振角度和产生 SPB 电场强度的相互作用规律有待进一步验证,且这规律有必要进一步推广到其他类 M 形结构中。

本文在文献^[46]的基础上,设计了 V 形、N 形及 M+V 形等金属狭缝纳米阵列结构,调控产生了 SPB;讨论了入射光波偏振角度和产生的 SPB 电场强度的相互作用规律。在此基础上,以 M 形结构为例,进一步讨论了结构参数对产生的 SPB 电场强度的影响。实验结果表明:结构臂之间夹角的改变不影响入射光波偏振角度与 SPB 电场强度相互作用的基本规律,都满足正弦函数分布;结构臂之间夹角、结构参数影响 SPB 电场强度的分布,但是不改变入射光波偏振角度和 SPB 电场强度相互作用的基本规律。这些结果为 SPB 产生器的设计和优化提供了指导。

2 原理和计算方法

SPB 作为一种在 x - y 平面内传播的特殊 SPPs 束,满足二维条件下的亥姆霍兹方程^[22-24]:

$$\nabla^2 \mathbf{E}_{\text{spp}}(x, y) + \mathbf{k}_{\text{spp}}^2 \mathbf{E}_{\text{spp}}(x, y) = 0, \quad (1)$$

式中: \mathbf{k}_{spp} 为 SPPs 在金属表面上的波矢; $\mathbf{E}_{\text{spp}}(x, y)$ 为 SPB 在 x - y 平面的电场强度分布,由 n 个独立的 SPP 波叠加而成,即 $\mathbf{E}_{\text{spp}}(x, y) = \sum \mathbf{E}_n(x, y)$, 其中 $\mathbf{E}_n(x, y)$ 是平面内第 n 个辐射源辐射的 SPPs 场。在辐射源结构参数合理、观察点在远场、不考虑辐射源之间相互作用等特殊情况下,每个辐射源辐射可

以近似为电偶极子辐射,如图 1 所示,辐射场可以近似表达为 $E_n(x, y) \approx E_0 \sin \theta \exp(-jkr_n)$, 其中 r_n 为第 n 个结构距离观察点 p 的距离。因此, n 个独立的 SPP 波叠加后的 $E_{\text{spp}}(x, y)$ 可以用天线阵列辐射(电

偶极子辐射叠加)原理阐述。

图 1(b) 是 n 个均匀天线阵列的辐射基本原理图。观察点 p 的电场等于多个辐射单元的辐射场的矢量和,可近似表示为

$$E_{\text{spp}}(x, y) = \sum_{i=1}^N E_i \approx E_1 \{1 + \exp(j\varphi) + \exp(j2\varphi) + \dots + \exp[j(N-1)\varphi]\} \approx E_1 \left| \frac{1 - \exp(jN\varphi)}{1 - \exp(j\varphi)} \right| \approx E_0 \sin \theta f_N, \quad (2)$$

式中:相邻两个点阵辐射场之间的相位差 $\varphi = kd \sin \theta$, $\sin \theta$ 为方向因子, d 为相邻两辐射源结构之间的距离;

N 为结构数量;阵因子 $f_N = \left| \frac{1 - \exp(jN\varphi)}{1 - \exp(j\varphi)} \right|$ 。显然

方向因子 $\sin \theta$ 只跟阵元本身的结构和取向有关,而阵因子 f_N 只跟阵元的排列、激励源的振幅、相位有关,与阵元无关。把每个独立辐射源的偶极辐射场分解在 x, y 轴坐标中,可以把(2)式简化为

$$E_{\text{spp}}(x, y) \approx \sum_{i=1}^N (c_1 E_0 \cos \beta \hat{x} + c_2 E_0 \sin \beta \hat{y}) \sin \theta \exp(-j\mathbf{k}_{\text{spp}} \mathbf{r}_n) \approx nc_2 E_0 \sin \theta \sin \beta \left[1 + \frac{c_1}{c_2} \cot \beta \right] \exp(-j\mathbf{k}_{\text{spp}} \mathbf{r}_1) \times \left[1 + \sum_{n=1}^N \cos(\mathbf{k}_{\text{spp}} \Delta \mathbf{r}_n) \right], \quad (3)$$

式中: β 为作用于独立辐射源结构的入射光波的偏振角度; c_1 和 c_2 分别为该入射光波的 x 和 y 偏光与结构的相互作用系数(耦合系数); $\sum_{n=1}^N \cos(\mathbf{k}_{\text{spp}} \Delta \mathbf{r}_n)$ 项提供了 SPB 的相位分布因子,令 SPB 的相位 $\varphi(x) =$

$\sum \varphi_n(x) = \sum \mathbf{k}_{\text{spp}} \Delta \mathbf{r}_n$, 其中 $\Delta \mathbf{r}_n = \mathbf{r}_{n+1} - \mathbf{r}_n$ 。从(3)式可以看出,叠加后的 $E_{\text{spp}}(x, y)$ 的传输分布主要依赖于相位 $\varphi(x)$, 强度分布受入射光波偏振角度 β 、方向因子 $\sin \theta$ 及结构的耦合系数 c 的影响。

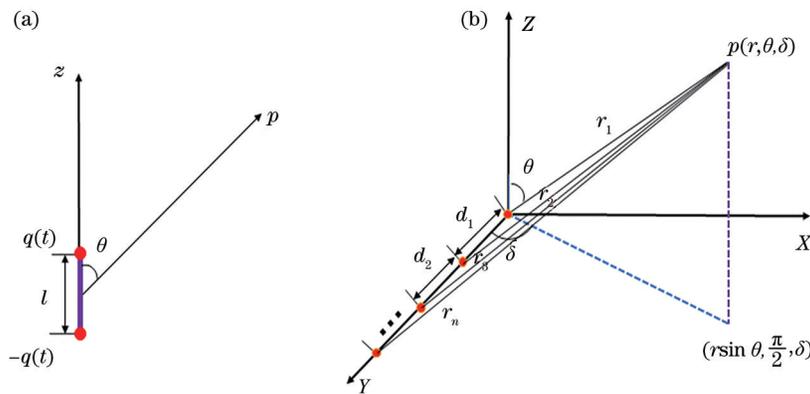


图 1 天线阵列辐射原理图。(a) 单个电偶极子在 p 点的辐射图; (b) N 个电偶极子共同在 p 点的辐射图
Fig. 1 Schematic of electric dipole radiation. (a) Radiation diagram of a single electric dipole at point p ;
(b) radiation diagram of N electric dipoles at point p

为了设计独立辐射源的位置,采用了相位匹配法^[24,26-27],即 $\phi(x) = \varphi(x)$, 其中 $\phi(x)$ 是目标 SPB 所对应的相位函数,可以采用勒让德变化反演出来^[26,28,31]。勒让德变化反演目标函数曲线相位函数的核心思想是用目标曲线各个点所对应的切线函数,确定与 x 轴的相交点,即满足几何关系^[26]:

$$\phi(x) = - \int k_0 \tan \theta / \sqrt{1 + \tan^2 \theta} dx, \quad (4)$$

式中: $\tan \theta$ 是目标函数曲线 $f(y)$ 的一阶导数。近似处理时 ($\sin \theta = \tan \theta / \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \approx \tan \theta$) 可以把(4)式简化为^[26]

$$\phi(x) = - \int k_0 \sin \theta dx. \quad (5)$$

利用(4)式,在近轴近似条件下,对目标曲线函数 $f(y) = -ay^2$ 进行相位反演,得到 $\phi(x) = -1.33kax^{1.5}$ 。选取常数 $a = 1.33 \times 10^{-2}$,利用相位匹配,求解确定每一个辐射源的独立位置,如图 2(a)所示,其中 H_n 为相邻两个结构之间的竖直方向上的距离。

应用时域有限差分(FDTD)法对 SPB 的传输特性进行了数值模拟仿真。FDTD solution 是 ANSYS Lumerical 推出的一款基于 FDTD 法的数值模拟商业软件。用该软件设计了 V 形、N 形、M 形以及 M+V 形结构阵列,通过设置结构材料的参数、划分网格、周期性边界条件、适当的监视

器得到了电场强度的分布图。图 2(b)是设计的 20 个独立的 M 形结构组成的阵列俯视图(x - y 平面示意图)。图 2(c)是单个 M 形结构 x - z 平面和参数的示意图,其中 L 和 w 分别为单个 M 形结构臂的长和宽, α 为 M 形结构臂与臂之间的夹角,底层二氧化硅的厚度为 250 nm,金层的厚度选取 200 nm。波长 $\lambda = 800$ nm 的线偏振光(沿 x 方向)垂直于二氧化硅基底正对 M 形结构缝隙处($+y$ 方向)入射,激发 SPPs。金属层的相对介电常数选为 $-24 + 1.506i$ ^[47]。在实验上可通过甩胶(负胶)、曝光、显影、定影、垂直蒸镀金膜、除胶 6 个流程制备设计结构。

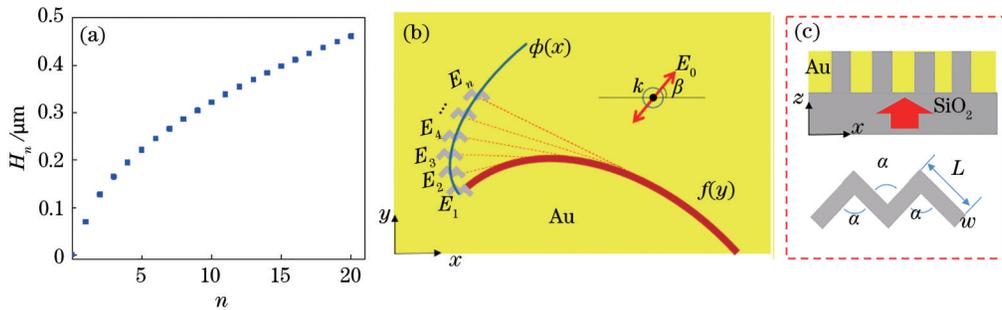


图 2 M 结构分布与结构参数图。(a) 每个 M 结构作为独立辐射源的位置参数;(b) 设计的 M 形结构俯视图;(c) M 形结构剖面图及参数

Fig. 2 M-shaped structure distribution and structural parameters. (a) Position parameter of each M-typed structure as independent radiation; (b) top view of the designed M-shaped structure; (c) section and parameters of M-shaped structure

3 结果与讨论

图 3(a)~(d) 分别是 $\alpha = 90^\circ, \beta = 0^\circ$ 时设计的 V 形、N 形、M 形及 M+V 形结构阵列产生的 SPB 电场强度分布图,其中插图是设计的单个结构,结构参数和图 2(c) 的 M 形结构参数完全相同。图 3(e) 是这些结构产生的 SPB 分别在 $x = 20 \mu\text{m}$ 处的电场强度截面分布的对比图。这些结果说明,用相位匹配法,这些不同的结构阵列可以产生 SPB,且产生的 SPB 的形状不受结构改变的影响。图 3(f) 是在角度 β 不同时,分别在各个结构阵列产生的 SPB 上选取的点 $A(x = 11 \mu\text{m}, y = -2 \mu\text{m})$ 处的电场强度极坐标分布图,实线是根据各个电场强度值拟合出来的曲线,曲线函数呈正弦函数分布,与(3)式的变化规律是一致的,说明这些不同结构产生 SPB 的电场强度和入射光波偏振角度满足的规律不随结构而变化。还可以看出,随着 V 形、M 形以及 M+V 形结构的变化,谱线发生了红移,且电场强度值先增大后减小,说明可以近似把 M 形和 M+V 形结构

分别看成 2 个和 3 个 V 形结构的组合。当然,随着 V 形结构个数的增多,结构之间的耦合不能被忽略,会破坏 SPPs 辐射的方向,也是 SPB 形状在不同结构下的电场分布有所不同的原因。

为了更好地阐述结构参数和产生 SPB 之间的关系,以 M 形结构为例进行相关分析。图 4 是 M 形结构臂之间的夹角 α 分别为 $30, 60, 90, 120^\circ$ 时,不同的入射光波偏振角 β 下,SPB 上点 $A(x = 11 \mu\text{m}, y = -2 \mu\text{m})$ 处的电场强度极坐标分布图。实线分别为各组电场强度值所拟合的曲线,拟合函数为

$$f = B + C \sin(Dx + E), \quad (6)$$

式中:不同结构夹角所产生的 SPB 场强的拟合值分别为 0.94, 0.95, 0.96, 0.95。这个拟合的函数和(3)式的变化规律基本是一致的,都满足正弦函数分布。说明改变结构臂之间夹角 α 与改变不同的入射光波偏振角 β , SPB 的电场强度变化所满足的规律是一致的。从图 4 也可以看出,当夹角 α 变化时,SPB 的电场强度最大最小值分别出现在不同的入射光波偏振角处,例如, $\alpha = 30^\circ$ 时,出现在 $\beta = 15^\circ$ 和

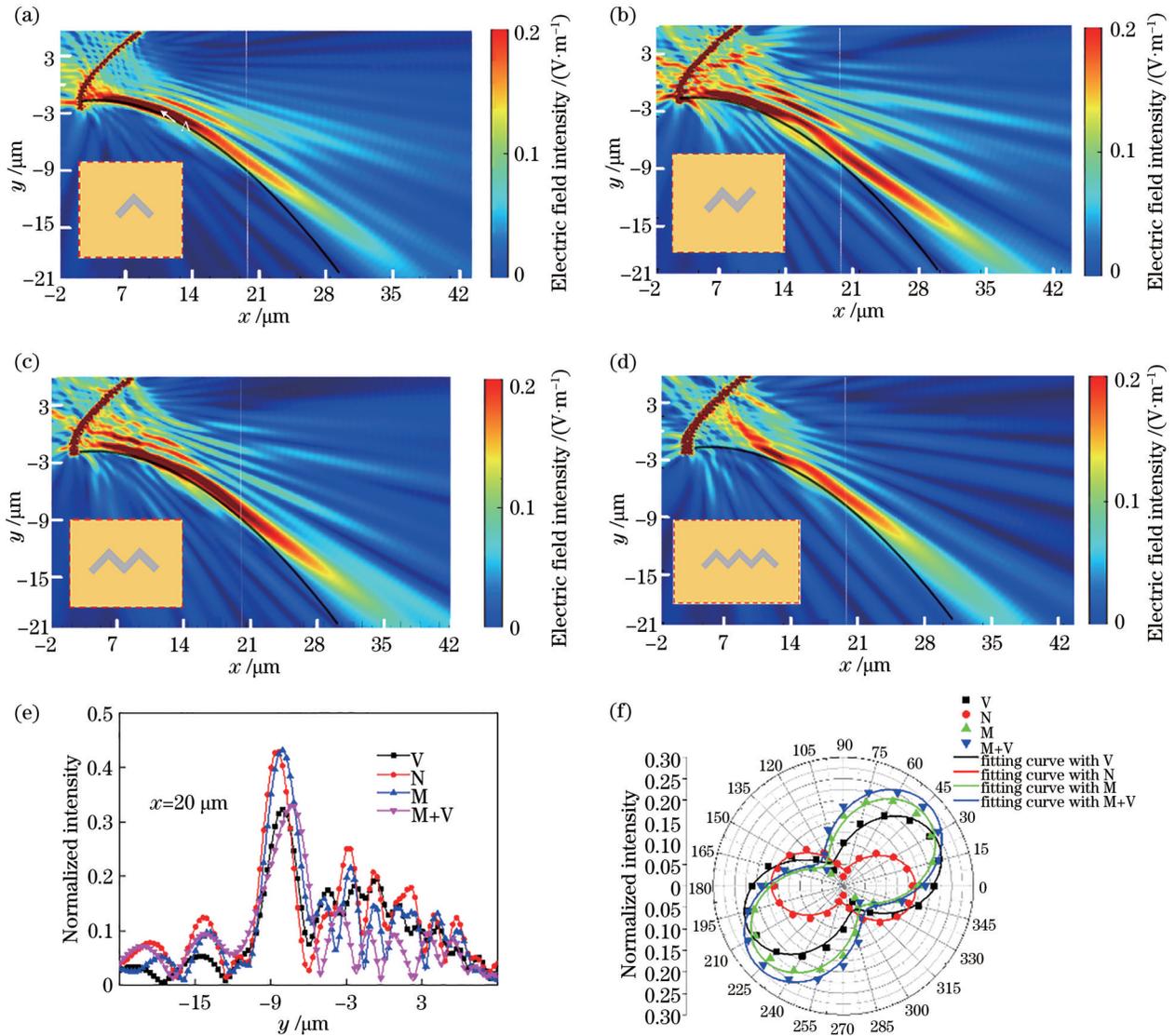


图3 不同结构阵列产生的SPB电场强度分布图。(a) V形;(b) N形;(c) M形;(d) M+V形;(e)这些结构产生的SPB在 $x=20 \mu\text{m}$ 处的电场强度截面分布;(f) 改变 β 时,多种结构产生的SPB在A点的电场强度极坐标分布图

Fig.3 Electric field intensity distribution of the SPB generated by different structure array. (a) V-shaped; (b) N-shaped; (c) M-shaped; (d) M+V-shaped; (e) transverse electric field intensity distribution of SPB at $x=20 \mu\text{m}$ for these different structures; (f) polar diagram of electric field intensity at point A with varied polarization angle β

105°附近; $\alpha=60^\circ$ 时,出现在 $\beta=0^\circ$ 和 105°附近; $\alpha=90^\circ$ 时,出现在 $\beta=45^\circ$ 和 135°附近; $\alpha=120^\circ$ 时,出现在 $\beta=60^\circ$ 和 150°附近。这主要是因为不同的夹角 α 作用下, c_1/c_2 值发生变化,且 c_1/c_2 值和入射光波偏振角 β 共同影响了叠加后SPB的 $E_{\text{spp}}(x, y)$ 分布,如(3)式所示。这里的入射光波与结构相互作用的耦合系数 $c^{[34]}$ 可以近似表示为

$$c = \int_{-\infty}^{+\infty} [\mathbf{E}_y(x, y) \mathbf{H}_z^{\text{spp}}(x, y) - \mathbf{H}_z(x, y) \mathbf{E}_y^{\text{spp}}(x, y)] dy, \quad (7)$$

式中: $[\mathbf{H}_z^{\text{spp}}(x, y), \mathbf{E}_y^{\text{spp}}(x, y)]$ 代表SPB传播方向上

的理论计算值; $[\mathbf{H}_z(x, y), \mathbf{E}_y(x, y)]$ 代表实际模拟的值。根据(3)、(7)式,计算了 $\alpha=90^\circ$ 、 $L=300 \text{ nm}$ 和 $w=80 \text{ nm}$ 时的 c_1 和 c_2 , 得到 $c_1/c_2 \approx 1$ 。显然此时SPB的 $E_{\text{spp}}(x, y)$ 的最大、最小值分别出现在偏振角 $\beta=45^\circ$ 和 135°附近,与数值模拟值是基本一致的^[46]。

图5(a)是当 $\alpha=45^\circ, \beta=0^\circ$ 时, M形结构产生的SPB电场强度分布图,图5(b)、(c)是 $\beta=0^\circ$ 的情况下,改变结构臂之间的夹角 α , 在 $x=20 \mu\text{m}$ 处所对应的电场强度截面谱线图。可以看出,随着 M形结构臂之间的夹角 α 从 0° 增大到 180° , 产生的SPB的

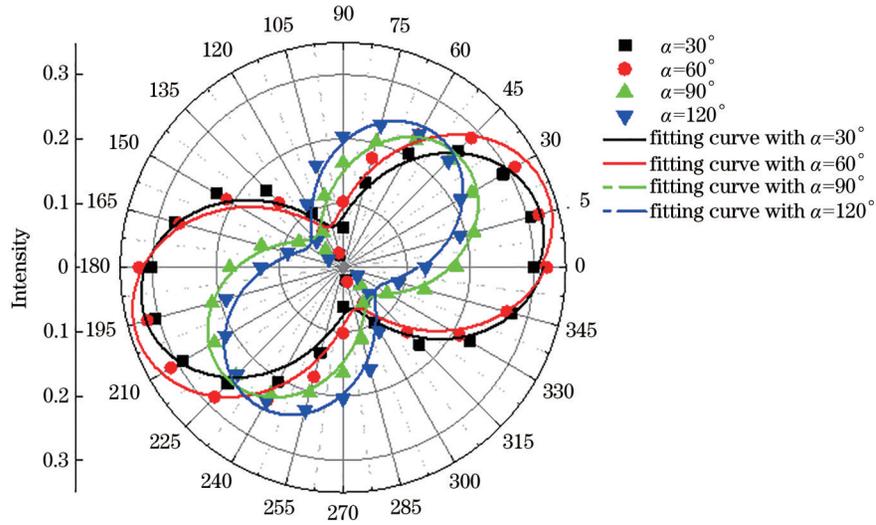


图 4 β 所对应的 A 点的电场强度极坐标分布图

Fig. 4 Polar diagram of electric field intensity at point A with varied polarization angle β

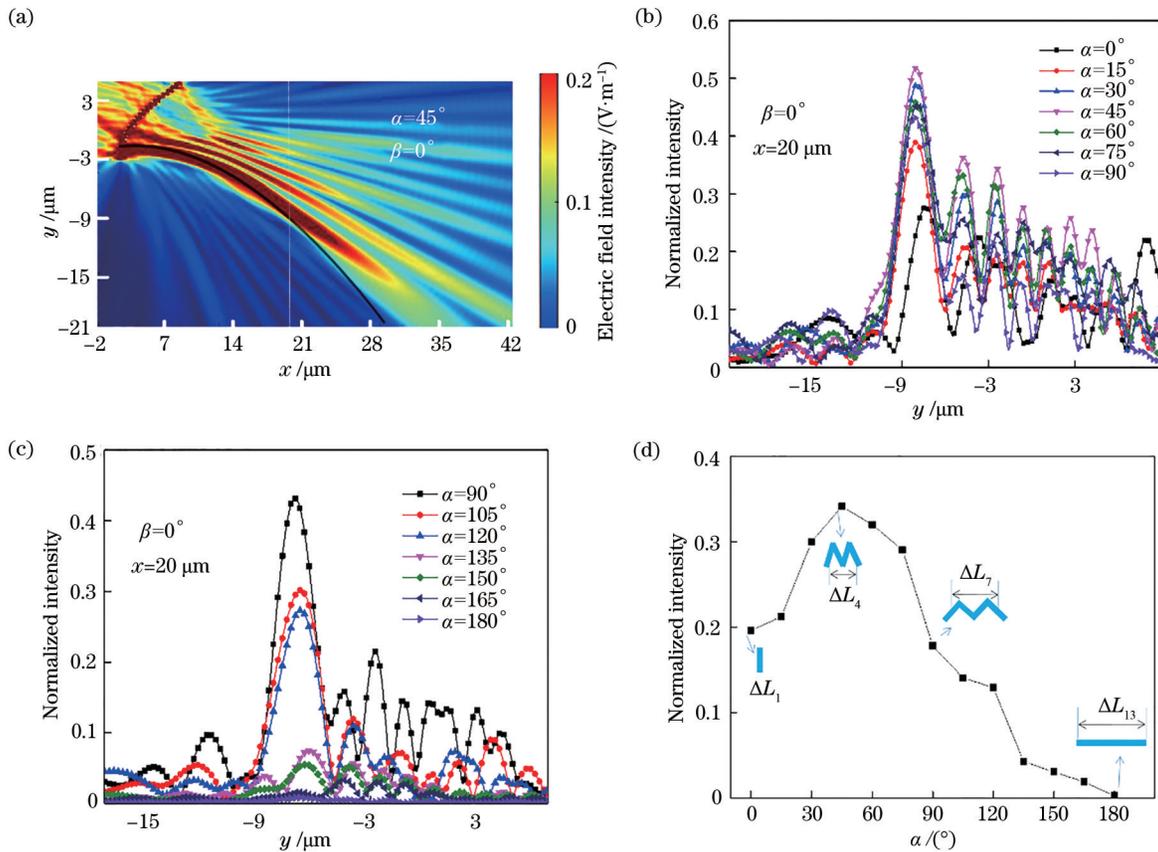


图 5 当 α 和 β 处于不同条件时,产生 SPB 的电场强度分布图。(a) $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$; (b)(c) $\beta = 0^\circ, \alpha$ 改变时,在 $x = 20 \mu\text{m}$ 处的电场强度截面分布; (d) $\beta = 0^\circ, \alpha$ 改变时, A 点的电场强度曲线

Fig. 5 Electric field intensity distribution of the generated SPB with α and β in different conditions. (a) $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$; (b)(c) transverse electric field intensity distribution at $x = 20 \mu\text{m}$ with $\beta = 0^\circ$ and varied angle α ; (d) transverse electric field intensity at point A with $\beta = 0^\circ$ and varied angle α

电场强度先增大后减小。图 5(d) 是结构臂之间的夹角 α 变化时, SPB 上点 A ($x = 11 \mu\text{m}, y = -2 \mu\text{m}$)

处的电场强度值的谱线图。再次证明, 随着角度 α 的增大, SPB 的电场强度先增大后减小。这主要是

因为角度 α 的增大可以等效地看作是 M 形结构两臂之间的有效距离 ΔL_n 的增大, 如图 5(d) 插图所示。

图 6(a) 是 $\alpha=45^\circ, \beta=0^\circ, w=80 \text{ nm}$, L 从 220 nm 增大到 340 nm 时在 $x=20 \mu\text{m}$ 处的电场强度截面分布图, 可以看出, 随着 L 增大, SPB 的电场强度先增大后减小。图 6(b) 是 $\alpha=45^\circ, \beta=0^\circ, L=300 \text{ nm}$, w 从 50 nm 增大到 90 nm 时在 $x=20 \mu\text{m}$ 处的电场强度截面分布

图, 可以看出, 随着 w 增大, SPB 的电场强度先增大后减小。实验结果表明: M 形结构几何参数的改变基本不影响 SPB 的形状, 但是影响 SPB 的电场强度变化, 且变化的规律与改变夹角 α 变化时的规律 (随着 α 增大, 先增大后减小) 基本一致。再次说明, 耦合系数 c_1 和 c_2 受到结构的几何参数的影响, c_1/c_2 和入射光波偏振角 β 共同影响了叠加后 SPB 的 $E_{\text{spp}}(x, y)$ 分布。

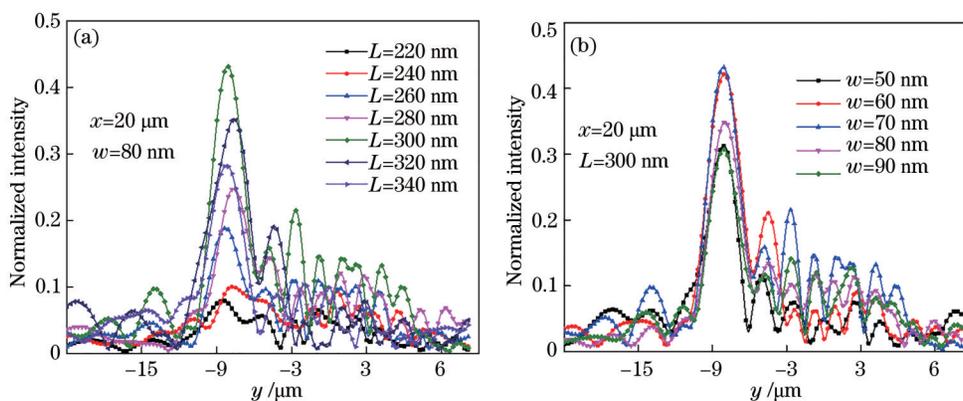


图 6 $\alpha=45^\circ, \beta=0^\circ$ 情况下, L 变化和 w 变化时 $x=20 \mu\text{m}$ 处的电场强度截面分布图。(a) L 变化; (b) w 变化

Fig. 6 Transverse electric field intensity distribution at $x=20 \mu\text{m}$ for different L and w with $\alpha=45^\circ$ and $\beta=0^\circ$. (a) Different L ; (b) different w

4 结 论

应用时域有限差分法研究了多种金属纳米狭缝 (V 形、N 形、M 形以及 M+V 形) 阵列的 SPPs 传输调控特性。通过相位匹配原理, 调控产生了 SPB; 讨论了不同结构臂之间的夹角 α 、入射光波偏转角 β 和产生的 SPB 电场强度间的相互作用基本规律。实验结果表明: 结构臂之间的夹角 α 不影响入射光波偏转角 β 对 SPB 电场强度影响的基本规律, 但是结构臂之间的夹角、结构参数以及结构间的耦合都影响 SPB 的电场强度的分布, 尤其是 M 形和 M+V 形结构可以近似看成 2 个和 3 个 V 形结构组合来处理。这些结果为 SPB 产生器的进一步设计和优化提供了指导。

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] Li P. Research progress of plasmonic nanofocusing [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(14): 146201. 李盼. 表面等离激元纳米聚焦研究进展[J]. 物理学报, 2019, 68(14): 146201.
- [3] Luo X G, Yan L S. Surface plasmon polaritons and its applications[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4 (2): 590-595.
- [4] Zhang W J, Gao L, Wei H, et al. Modulation of propagating surface plasmons[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(14): 147302. 张文君, 高龙, 魏红, 等. 表面等离激元传播的调制 [J]. 物理学报, 2019, 68(14): 147302.
- [5] Yin X, Zhu H, Guo H J, et al. Hyperbolic metamaterial devices for wavefront manipulation[J]. Laser & photonics reviews, 2019, 13(1): 1800081.
- [6] Li T, Li Z C, Chen S Q, et al. Efficient generation of broadband short-wave infrared vector beams with arbitrary polarization[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(2): 021107.
- [7] Chen S Q, Li Z C, Liu W W, et al. From single-dimensional to multidimensional manipulation of optical waves with metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2019, 31(16): e1802458.
- [8] Liu Y X, Stief F, Yu M. Subwavelength optical trapping with a fiber-based surface plasmonic lens[J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 721-723.
- [9] Liu Y X, Xu H, Stief F, et al. Far-field superfocusing with an optical fiber based surface plasmonic lens made of nanoscale concentric annular

- slits[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20233-20243.
- [10] Juan M L, Righini M, Quidant R. Plasmon nano-optical tweezers[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 349-356.
- [11] Arlt J, Garces-Chavez V, Sibbett W, et al. Optical micromanipulation using a Bessel light beam[J]. *Optics Communications*, 2001, 197(4/5/6): 239-245.
- [12] Schuller J A, Barnard E S, Cai W, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 193-204.
- [13] Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(11): 675-678.
- [14] Minovich A, Klein A E, Janunts N, et al. Generation and near-field mapping of Airy plasmons [C]//35th Australian Conference on Optical Fibre Technology, December 5-9, 2010, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2010: 1-3.
- [15] Salandrino A, Christodoulides D N. Airy plasmon: a nondiffracting surface wave[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 2082-2084.
- [16] Liu W, Neshev D N, Shadrivov I V, et al. Plasmonic Airy beam manipulation in linear optical potentials[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1164-1166.
- [17] Shi W B, Liu L Z, Peng R W, et al. Strong localization of surface plasmon polaritons with engineered disorder[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(3): 1896-1902.
- [18] Guan C Y, Ding M, Shi J H, et al. Experimental observation and analysis of all-fiber plasmonic double Airy beams[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18365-18371.
- [19] Zhu X, Schülzgen A, Wei H, et al. White light Bessel-like beams generated by miniature all-fiber device[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11365-11374.
- [20] Libster-Hershko A, Epstein I, Arie A. Rapidly accelerating Mathieu and Weber surface plasmon beams[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(12): 123902.
- [21] Lin J, Dellinger J, Genevet P, et al. Cosine-Gauss plasmon beam: a localized long-range nondiffracting surface wave[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(9): 093904.
- [22] Xiao K, Wei S B, Min C J, et al. Dynamic cosine-Gauss plasmonic beam through phase control[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13541-13546.
- [23] Epstein I, Lilach Y, Arie A. Shaping plasmonic light beams with near-field plasmonic holograms[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(7): 1642-1647.
- [24] Epstein I, Arie A. Arbitrary bending plasmonic light waves[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(2): 023903.
- [25] Li L, Li T, Wang S M, et al. Collimated plasmon beam: nondiffracting versus linearly focused[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(4): 046807.
- [26] Epstein I, Arie A. Dynamic generation of plasmonic bottle-beams with controlled shape[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3165-3168.
- [27] Song E Y, Lee S Y, Hong J, et al. A double-lined metasurface for plasmonic complex-field generation [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(2): 299-306.
- [28] Avayu O, Epstein I, Eizner E, et al. Polarization controlled coupling and shaping of surface plasmon polaritons by nanoantenna arrays[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1520-1523.
- [29] Lee S Y, Kim K, Kim S J, et al. Plasmonic metaslit: shaping and controlling near-field focus[J]. *Optica*, 2015, 2(1): 6-13.
- [30] Huang F, Jiang X Q, Yuan H M, et al. Generation of plasmonic vortex with linearly polarized light[J]. *Plasmonics*, 2017, 12(3): 751-757.
- [31] Epstein I, Remez R, Tsur Y, et al. Generation of intensity-controlled two-dimensional shape-preserving beams in plasmonic lossy media[J]. *Optica*, 2015, 3(1): 15-19.
- [32] You O B, Bai B F, Sun L, et al. Versatile and tunable surface plasmon polariton excitation over a broad bandwidth with a simple metaline by external polarization modulation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 22061-22073.
- [33] Lee G Y, Lee S Y, Yun H, et al. Near-field focus steering along arbitrary trajectory via multi-lined distributed nanoslits[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33317.
- [34] Huang F, Jiang X Q, Yang H N, et al. Tunable directional coupling of surface plasmon polaritons with linearly polarized light[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(1): 1-6.
- [35] Su V C, Chu C H, Sun G, et al. Advances in optical metasurfaces: fabrication and applications[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13148-13182.
- [36] Guo L J, Zheng B, Zheng K, et al. Launching phase-

- controlled surface plasmons on Babinet metasurfaces [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3253-3256.
- [37] Song E Y, Lee G Y, Park H, et al. Compact generation of Airy beams with C-aperture metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(10): 1601028.
- [38] Ding F, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2017, 81(2): 026401.
- [39] Ko H, Kim H C, Cheng M. Light focusing at metallic annular slit structure coated with dielectric layers[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(6): 950-954.
- [40] Zhang X T, Yan L S, Guo Y H, et al. Enhanced far-field focusing by plasmonic lens under radially polarized beam illumination[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1): 109-115.
- [41] Tang X M, Li L, Li T, et al. Converting surface plasmon to spatial Airy beam by graded grating on metal surface[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1733-1735.
- [42] Genevet P, Dellinger J, Blanchard R, et al. Generation of two-dimensional plasmonic bottle beams[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10295-10300.
- [43] Chen J, Chen X, Li T, et al. On-chip detection of orbital angular momentum beam by plasmonic nanogratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1700331.
- [44] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, et al. Multidimensional optical control: coherent pixel design of metasurfaces for multidimensional optical control of multiple printing-image switching and encoding[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(51): 1870366.
- [45] Li H, Qu Y, Ullah H, et al. Controllable multiple plasmonic bending beams via polarization of incident waves[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29659-29666.
- [46] Li H, Tang Y Y, Yang H, et al. Manipulating surface plasmon polaritons with M-shaped nanoslit array via polarized incident waves[J]. *Europhysics Letters*, 2019, 127(2): 25001.
- [47] Ordal M A, Long L L, Bell R J, et al. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(7): 1099-1119.