

DOI: 10.12086/oe.2022.220105

# 基于悬链线纳米粒子超构表面的线偏振光 SPPs 定向激发

韩莹莹<sup>1</sup>, 陈盼盼<sup>1</sup>, 王曼<sup>1</sup>,  
黄万霞<sup>1,2\*</sup>, 石风华<sup>1,2\*</sup>, 石建平<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241000;

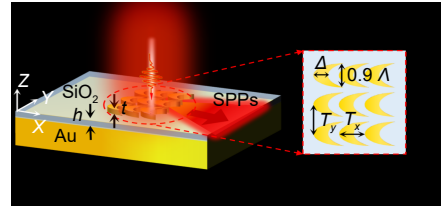
<sup>2</sup>光电材料科学与技术安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241000

**摘要:** 表面等离子激元 (Surface plasmon polaritons, SPPs) 定向激发是片上集成光子系统研发的基础, 利用悬链线超构表面来实现 SPPs 的定向激发调控是近年来的热点和前沿领域, 但现有研究多针对圆偏振光, 线偏振光 SPPs 的定向激发相对较少。本文设计了一个基于悬链线纳米粒子的超构表面来实现线偏振光 SPPs 定向激发。采用时域有限差分法计算了 x 偏振光入射下的光谱消光比曲线和电场分布, 根据多级散射理论和惠更斯-菲涅尔原理解释了定向激发的物理机制。仿真结果显示, 悬链线纳米粒子超构表面对线偏振 SPPs 的定向调控是有效的, 峰值消光比可达 27 dB (对应入射波长 820 nm), 10 dB 以上带宽约为 47 nm (798 nm~845 nm), 该结果有助于悬链线多功能器件的研究与开发。

**关键词:** 悬链线纳米粒子; 超构表面; SPPs 定向激发; 线偏振光

中图分类号: O439

文献标志码: A



韩莹莹, 陈盼盼, 王曼, 等. 基于悬链线纳米粒子超构表面的线偏振光 SPPs 定向激发 [J]. 光电工程, 2022, 49(10): 220105  
Han Y Y, Chen P P, Wang M, et al. SPPs directional excitation of linearly polarized light based on catenary nanoparticle metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220105

## SPPs directional excitation of linearly polarized light based on catenary nanoparticle metasurface

Han Yingying<sup>1</sup>, Chen Panpan<sup>1</sup>, Wang Man<sup>1</sup>, Huang Wanxia<sup>1,2</sup>,  
Shi Fenghua<sup>1,2\*</sup>, Shi Jianping<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China;

<sup>2</sup>Anhui Province Key Laboratory of Photo-electronic Materials Science and Technology, Wuhu, Anhui 241000, China

**Abstract:** Surface plasmon polaritons (SPPs) directional excitation is the basis for the development of on-chip integrated photonic systems. And SPPs directional excitation based on the catenary metasurface is a hot and frontier field in recent years, however, the SPPs directional excitation with linearly polarized light is less than that of circularly polarized light. In this paper, we design a catenary nanoparticle metasurface to realize the SPPs directional excitation with linearly polarized light. The spectral extinction ratio curve and electric field distribution under the incident of x-polarized light are calculated with the finite difference time domain. The physical mechanism of SPPs directional excitation is explained according to the multi-level scattering theory and the Huygens-Fresnel principle. The simulation results show that the SPPs directional excitation with linearly polarized light based on the

收稿日期: 2022-05-31; 收到修改稿日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61775002); 安徽省自然科学基金资助项目 (2108085MA23, 808235830016)

\*通信作者: 石风华, fhshi@ahnu.edu.cn; 石建平, jps51062@mail.ahnu.edu.cn.

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

catenary nanoparticle metasurface is effective, and the peak extinction ratio is up to 27 dB (corresponding to the incident wavelength of 820 nm), and the bandwidth above 10 dB is about 47 nm (798 nm~845 nm). Therefore, these results are helpful for the research and development of the catenary multifunctional devices.

**Keywords:** catenary nanoparticle; metasurface; SPPs directed excitation; linearly polarized light

## 1 引言

表面等离子激元 (Surface plasmon polaritons, SPPs) 是一种金属与介质表面存在的特殊电磁模式, 具有亚波长局域特性, 可以实现微纳尺度上光子的操控, 在超分辨<sup>[1-3]</sup>、超透镜<sup>[4-5]</sup>、光子芯片<sup>[6-7]</sup>、全息技术<sup>[8-9]</sup>等多个技术领域已经展现了巨大的应用潜力。SPPs 定向传输是 SPPs 技术应用的基础和前提, 一直以来备受关注意<sup>[10]</sup>。早期的 SPPs 定向激发研究中多采用纳米狭缝和凹槽等结构<sup>[11-12]</sup>, 但是器件结构简单对称且尺寸大, 激发的电磁模式强度低, 导致消光比低、损耗和噪声大。

超构表面作为新兴的二维材料, 可以通过修改光波的边界条件实现对光波的灵活控制, 达到减小器件尺寸、提高器件集成度的要求<sup>[13-18]</sup>。近年来, 研究人员开始将其运用于 SPPs 定向激发领域。例如, 2019 年, Zhang 等人提出了一种尺寸仅为 300 nm × 300 nm 的 U 形纳米天线<sup>[19]</sup>, 根据天线中激发的等离子体共振模式, 并将其排列成超构表面实现了偏振可控的 SPPs 定向激发, 消光比可达 17 dB。2020 年, Meng 等人设计的间隙表面等离子体超构表面<sup>[20]</sup>, 可以在线性相位梯度下实现消光比 13 dB 的单向激发。不过, 上述器件中单元结构离散, 相位不能连续调控, 且激发出的 SPPs 共振模式单一, 导致器件消光比和带宽难以有大的突破。

悬链线作为生活中常见的曲线形式之一, 具有连续的线型, 相较于离散的超构表面具有独特的光学特性, 例如超宽的工作频带、连续且线性的相位变化和丰富的电磁模式等<sup>[21-22]</sup>。利用悬链线独特的光学性质, 科研人员将悬链线与超构表面结合已经在偏振分束、自加速光束产生、波形转换、红外光子器件等领域取得研究成果<sup>[23-27]</sup>。近年来, 悬链线结构也开始应用到 SPPs 定向激发调控中并取得了很好的效果。例如, 2018 年 Guo 等人研究了硅波导上单个悬链线纳米粒子的 SPPs 调控性能, 利用几何相位调控和自旋轨道相互作用, 实现了在圆偏振光入射下消光比大于 15 dB 的 SPPs 定向激发<sup>[28]</sup>。一年后 Jin 等人利用单列悬

链线孔径将消光比提高到了 26 dB<sup>[29]</sup>, 展示了悬链线结构在定向激发调控方面的优异性能。本课题组也曾于 2021 年研究了单一悬链线结构实现宽带 SPPs 定向激发的原理和方法<sup>[30]</sup>。

不过由于上述结构需要用到悬链线的几何相位调控性质, 还只能实现圆偏振光入射下的 SPPs 定向激发。为了拓展悬链线结构实现 SPPs 定向激发的光源偏振态选择性, 本文提出并设计了一种可以实现线偏振 SPPs 定向激发的悬链线超构表面。首先给出了基本器件模型, 然后从单元纳米粒子入手分析 SPPs 定向激发的原理, 最后设计超构表面阵列并进行功能验证。

## 2 器件模型

本文设计的基于悬链线纳米粒子超构表面的 SPPs 定向激发器件结构示意图如图 1 所示。器件结构由三层组成, 分别是衬底、间隔层和悬链线超表面层。衬底材料为 Au, 间隔层为厚度  $h=50$  nm 的 SiO<sub>2</sub> 薄膜, 超表面层由厚度  $t=100$  nm 的悬链线纳米粒子按周期排布而成, 材料仍然选择 Au。材料选择 Au 是因为可以更好地激发 SPP, 有利于提高定向激发效率, 同时金属材料性质相对稳定, 方便加工。

其中, 悬链线纳米粒子是由悬链线曲线沿  $X$  轴平移腰宽  $A$  得到。悬链线曲线表达式为<sup>[20]</sup>

$$x = \frac{A}{\pi} \ln \left| \sec \left( \frac{\pi y}{A} \right) \right|. \quad (1)$$

考虑到两条悬链线的交点在  $y=\pm A/2$ ,  $x=\infty$  处 ( $A$  为悬链线在  $Y$  方向的宽度), 因此根据实际加工需求, 对悬链线做截断处理, 本节将两条悬链线的交点位置设置为  $y=\pm 0.45A$  处, 因此截断后的悬链线纳米孔径的实际开口大小为  $0.9A$ 。

## 3 原理分析

为了分析该结构实现 SPPs 定向激发的原理, 利用有限时域差分算法对结构中的电磁场进行数值模拟仿真。光源选择  $x$ -极化线偏振光, 从结构上方垂直入射。Au 材料的相对介电常数与波长的函数关系取自

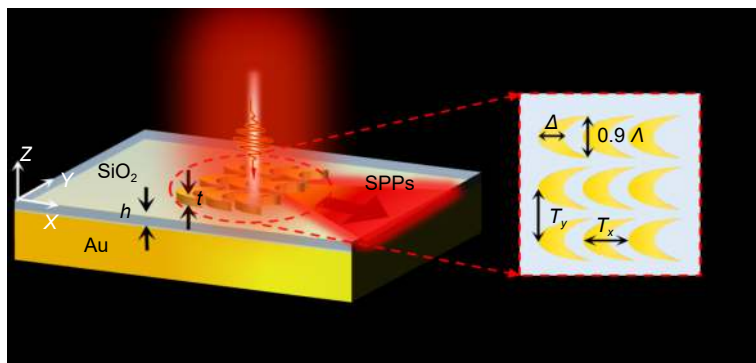


图 1 基于悬链线纳米粒子超构表面的 SPPs 定向激发器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SPPs directional excitation based on catenary nanoparticle metasurface

Palik 数据<sup>[31]</sup>, SiO<sub>2</sub>折射率取值 1.44。边界条件采用完全匹配层 (perfectly matched layer, PML), mesh 网格尺寸设置为 2 nm×2 nm×2 nm。悬链线超表面的具体参数是经过反复计算优化得到的, 分别为 0.9Λ=360 nm, Λ=240 nm, T<sub>x</sub>=740 nm, T<sub>y</sub>=420 nm。其中, T<sub>x</sub>, T<sub>y</sub>分别表示悬链线纳米粒子沿 X 和 Y 方向的排布周期。

我们首先仿真单元悬链线纳米粒子的光谱消光比曲线以及其在典型波长下的电场分布, 如图 2 所示。本文中的消光比 (excitation ration, ER) 定义为 ER=10×log(TR/TL), 其中, TL 和 TR 分别表示由结构左右两侧监视器测量获得的激发 SPPs 功率。

由图 2 可知单元悬链线纳米粒子在 836 nm 的光波长下消光比为 24 dB, 此外, 对于大多数定向激发器件来说, 消光比大于 10 dB 即可认为定向效果良好, 因此我们将带宽定义为器件消光比≥10 dB 的波段范围。从图中可以看出单元悬链线纳米粒子的带宽可以

达到 50 nm (820 nm~870 nm)。由此说明单元悬链线纳米粒子不仅具有较好的消光比而且也有一定的带宽。

为了分析单元悬链线纳米粒子实现 SPPs 定向激发的物理机制, 我们计算了三个典型波长 (820 nm、836 nm、860 nm) 下的电场分布, 如图 2 中插图所示。从图中可以看出, 在共振波长 836 nm 处, 整体电场分布表现出较为标准的电偶极子模式分布, 负电荷在内腰处聚集, 正电荷在外腰处聚集。而当入射波长偏离共振波长蓝移至 820 nm 时, 正电荷更多的聚集在悬链线的尖端处, 导致悬链线内外腰处的电荷减少, 电偶极子强度变低。同样地, 当入射波长红移至 860 nm 时, 负电荷逐渐向尖端移动, 正电荷沿着悬链线外腰处扩散, 电偶极子强度下降。由此可见, 不同波长处的电场分布整体可近似看成电偶极子模式分布, 负电荷集中分布在悬链线纳米粒子内腰处, 在悬链线纳米粒子外腰处存在少量正电荷, 但分布形态明

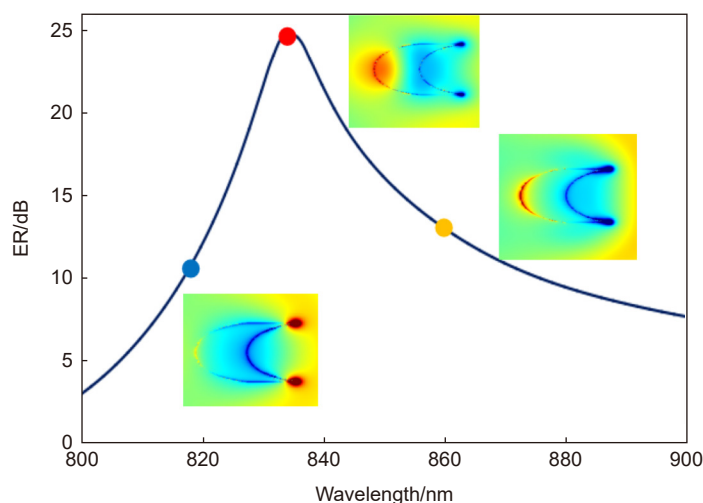


图 2 单元悬链线纳米粒子的光谱消光比曲线 (插图为典型波长下的电场分布)

Fig. 2 Spectral extinction ratio curve of unit catenary nanoparticle (Inset is the electric field distribution at typical wavelengths)

显不同, 从而引起定向消光比的变化, 因此我们推测悬链线纳米粒子中的电偶极子强度是影响消光比的主要因素 (这与我们前期工作中利用悬链线孔径阵列实现 SPPs 定向激发的原理大不相同)<sup>[32]</sup>。

为了验证这一推测, 我们根据多级散射理论对纳米粒子的多级散射强度进行定量计算。多级散射理论的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{电偶极矩: } \mathbf{P} &= \int \mathbf{J} d^3r / i\omega \\ \text{磁偶极矩: } \mathbf{M} &= \int \mathbf{r} \times \mathbf{J} d^3r / 2c \\ \text{电四极矩: } \mathbf{Q}_{\alpha\beta} &= \int [r_\alpha \mathbf{J}_\beta + r_\beta \mathbf{J}_\alpha - 2(\mathbf{r} \cdot \mathbf{J}) \delta_{\alpha\beta} / 3] d^3r / 2i\omega \\ \text{磁四极矩: } \mathbf{M}_{\alpha\beta} &= \int [(\mathbf{r} \times \mathbf{J})_\alpha r_\beta + (\mathbf{r} \times \mathbf{J})_\beta r_\alpha] d^3r / 3c, \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $\alpha, \beta = x, y, z$ ,  $\omega$  是光的角频率,  $c$  是真空中光速,  $\mathbf{r}$  是高斯坐标系空间中一点  $(x, y, z)$  到坐标原点的位矢。因此, 根据式 (2) 分解得到的多级散射强度公式如下:

$$\begin{aligned} \text{电偶极子散射强度: } I_P &= 2\omega^4 |\mathbf{P}|^2 / 3c^3 \\ \text{磁偶极子散射强度: } I_M &= 2\omega^4 |\mathbf{M}|^2 / 3c^3 \\ \text{电四极子散射强度: } I_Q^e &= \omega^6 \sum |\mathbf{Q}_{\alpha\beta}|^2 / 5c^5 \\ \text{磁四极子散射强度: } I_Q^m &= \omega^6 \sum |\mathbf{M}_{\alpha\beta}|^2 / 40c^5. \end{aligned} \quad (3)$$

从图 3 所示的多极散射强度分布图可以看出在所研究波段中, 电偶极子的散射强度均高于其他电磁模式的散射强度, 但在 836 nm 的入射光波长下, 电偶极子强度最大, 结合图 2 插图中的电场分布, 可以知道此处正是共振波长的位置, 可见 SPPs 共振时的确激发了更强的电偶极子。此外在单元悬链线纳米粒

子的有效带宽范围内 (820 nm~870 nm), 电偶极子散射强度和光谱消光比曲线均呈现先增加后减小的变化趋势, 二者存在正相关。

由此可见, 当  $x$  偏振光垂直入射到悬链线纳米粒子上, 在满足耦合所需的波矢匹配条件下, 结构会激发出 SPPs。在激发的 SPPs 模式中, 电偶极子、磁偶极子、电四极子和磁四极子模式均存在, 其中对定向激发影响最大的是电偶极子, 偶极强度越强消光比越大, 定向效果越好, 从消光比曲线上显示为共振峰。这可为 SPPs 定向激发的纳米粒子选型提供一定的参考。

### 4 超构表面阵列设计与验证

通过对单元悬链线纳米粒子的分析可知, 激发出高强度电偶极子模式的单元悬链线纳米粒子具有良好的 SPPs 定向激发效果, 不过由于纳米粒子尺寸有限, 为方便使用可以将其设计成阵列结构。考虑到单元粒子尺寸小于入射光波长, 可以将其视为点源处理。依据惠更斯-菲涅尔原理<sup>[27]</sup>, 将点源适当排列后经过相干叠加可以形成平面波。结合计算得知 SPPs 波长:

$$\lambda_{\text{SPP}} = \frac{\lambda_0}{(\epsilon_{\text{Au}} + \epsilon_{\text{Air}}) / (\epsilon_{\text{Au}} \cdot \epsilon_{\text{Air}})} \approx 826 \text{ nm}.$$

我们对阵列结构的周期参数进行了优化, 如图 4 所示。

图 4(a) 是对  $Y$  方向周期参数  $T_y$  优化的结果, 从图中可以看出当  $T_y$  在 380 nm~420 nm 之间时, 结构均具有一定的消光比, 只是消光比峰值会随着  $T_y$  的增加而增加。然而当  $T_y=440$  nm 时, 峰值消光比急剧下降,

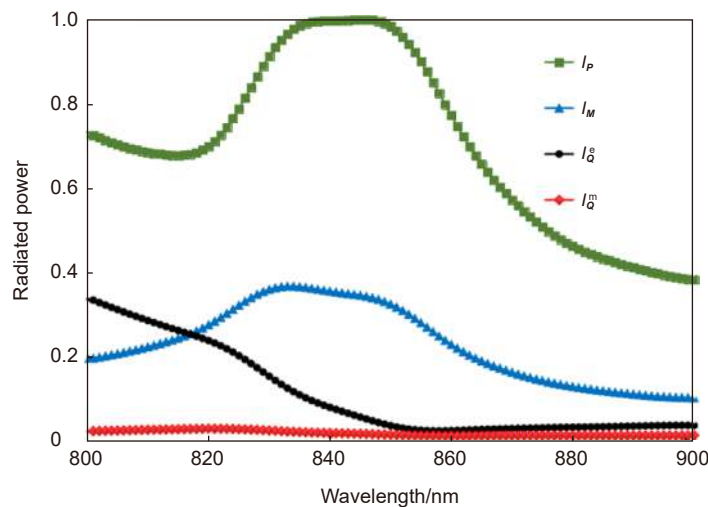


图 3 单元悬链线纳米粒子的多极散射强度分布图  
Fig. 3 Multipole scattering intensity distribution of unit catenary nanoparticles



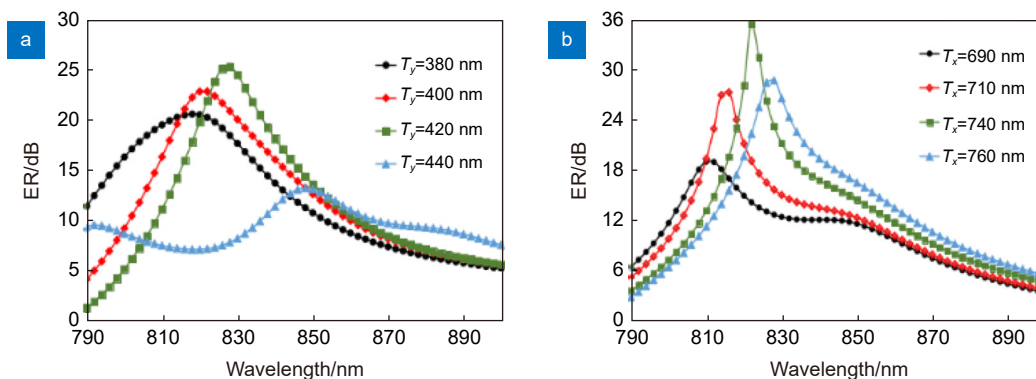


图 4 阵列结构周期参数优化结果图。(a)  $T_y$ ; (b)  $T_x$

Fig. 4 Array structure period parameter optimization results. (a)  $T_y$ ; (b)  $T_x$

结构失去定向效果。这是因为根据惠更斯-菲涅尔原理，沿  $Y$  方向的周期要设置为半个 SPPs 波长以满足干涉相消条件，仿真结果也验证了这一点，因此在悬链线纳米粒子超构表面中  $T_y$  设置为 420 nm。

图 4(b) 是对  $X$  方向周期参数  $T_x$  优化的结果，从图中可以看出不同数值的  $T_x$  对应的消光比曲线形式变化一致，均呈现出先增加后减小的趋势。峰值消光比也同样随着  $T_x$  的增加而先增加后减小，当  $T_x = 740$  nm 时，消光比达到最大。根据惠更斯-菲涅尔原理，沿  $X$  方向的周期要设置为一个 SPPs 波长以满足相干叠加条件。然而通过仿真结果验证，我们发现  $T_x$  参数并非完全满足条件，推测可能是因为悬链线纳米粒子激发的 SPPs 主要沿  $X$  方向传播，入射光照射到纳米粒子上产生的散射光可能会对其中的相干叠加造成影响，从而使  $T_x$  参数和理论存在一定的差异。此外结构中间的  $\text{SiO}_2$  层和上下金属层之间激发的 SPPs 可

能也会对结果造成影响。最终考虑到器件的消光比性能，在悬链线纳米粒子超构表面中沿  $X$  方向的周期  $T_x$  设置为 740 nm。

对优化后的超构表面 SPPs 定向特性进行了验证，光谱消光比曲线如图 5 所示。与单个悬链线纳米粒子的消光比曲线 (图 2) 对比可知，超表面结构峰值消光比提高了 3 dB，达到 27 dB，说明阵列结构有利于提高定向激发效率。带宽变化不大，但由于悬链线纳米粒子之间存在耦合，共振波长位置有所蓝移，从 836 nm 变成 820 nm，这在设计特定波长器件时候需要考虑。

为了证明该超构表面激发出了沿右侧定向传输的 SPPs，我们对  $X$ - $Y$  面电场进行了计算，入射波长选择共振波长 820 nm， $X$  方向极化。由于电场的  $z$  分量主要与 SPPs 的面内传播有关<sup>[33]</sup>，因此，我们只需对  $X$ - $Y$  面的  $E_z$  分量进行研究。结果如图 6 所示，

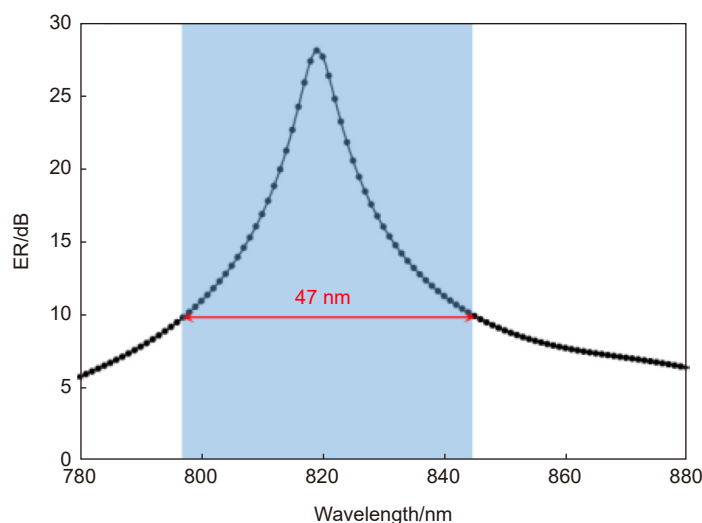


图 5 悬链线纳米粒子超构表面的光谱消光比曲线

Fig. 5 Spectral extinction ratio curves of catenary nanoparticle metasurfaces

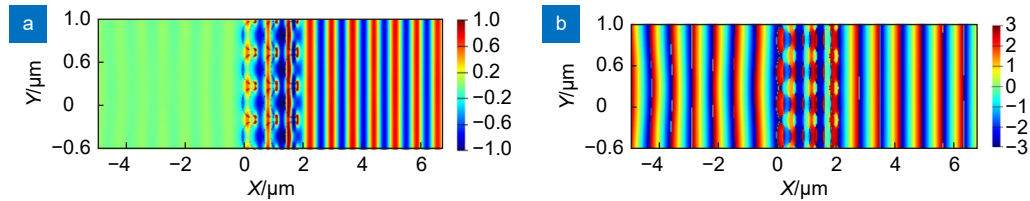


图6 悬链线纳米粒子超构表面的  $E_z$  场分布图。(a) 电场振幅；(b) 电场相位

Fig. 6  $E_z$  field distribution of catenary nanoparticle metasurface. (a) Electric field amplitude; (b) Electric field phase

6(a) 是  $E_z$  电场振幅, 6(b) 是  $E_z$  电场相位。从图 6(a) 中可以看出  $E_z$  电场振幅在结构激发侧高于非激发侧, 且沿着右侧传输。从图 6(b) 中可以看出  $E_z$  电场的等相位线在激发侧呈直线形式, 表明  $E_z$  电场在激发侧以类似于平面波的形式传输。综上可知, 悬链线纳米粒子超构表面在 x 偏振光入射下会激发出了向右侧定向传输的 SPPs。

## 5 总结

综上所述, 我们设计并验证了一种基于悬链线纳米粒子超构表面的 SPPs 定向激发器件。首先, 仿真分析了单元悬链线纳米粒子的消光比随波长的变化曲线以及其在典型波长下的电场分布。然后, 利用多级散射理论验证了其实现 SPPs 定向激发的内在物理机制源于共振波长下的电偶极子模式。最后, 根据惠更斯-菲涅尔原理设计了悬链线超构表面实现了高性能的线偏振光 SPPs 定向激发。结果表明, 在 820 nm 波长下消光比可达 27 dB, 10 dB 以上带宽约为 47 nm (798 nm~845 nm)。线偏振光 SPPs 定向激发一直是 SPPs 调控中的难点, 在原理和技术方案上都还没有定论, 本文探讨了通过激发悬链线纳米粒子中的电偶极子模式来实现高效线偏振 SPPs 定向传输的可能性, 有利于悬链线多功能器件的开发, 也可为设计其他片上集成 SPPs 光子器件提供参考。

## 参考文献

- [1] Zhou Y, Liang G F, Wen Z Q, et al. Recent research progress in optical super-resolution planar meta-lenses[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(12): 210399.  
周毅, 梁高峰, 温中泉, 等. 光学超分辨平面超构透镜研究进展[J]. *光电工程*, 2021, 48(12): 210399.
- [2] Li Z, Wang C T, Kong W J, et al. Broadband achromatic metasurface filter for apodization imaging in the visible[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 200466.  
李柱, 王长涛, 孔维杰, 等. 用于可见光波段切趾成像的宽带消色差超表面滤波器[J]. *光电工程*, 2021, 48(5): 200466.
- [3] Boneberg J, Leiderer P. Optical near-field imaging and nanostructuring by means of laser ablation[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, 1(1): 210003.
- [4] Dou K H, Xie X, Pu M B, et al. Off-axis multi-wavelength dispersion controlling metalens for multi-color imaging[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, 3(4): 190005.
- [5] Wang Y L, Fan Q B, Xu T. Design of high efficiency achromatic metalens with large operation bandwidth using bilayer architecture[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(1): 200008.
- [6] Xu N, Cheng Z D, Tang J D, et al. Recent advances in nano-opto-electro-mechanical systems[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(9): 2265-2281.
- [7] Zhang Y B, Liu H, Cheng H, et al. Multidimensional manipulation of wave fields based on artificial microstructures[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, 3(11): 200002.
- [8] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(11): 210030.
- [9] Chen K X, Xu C T, Zhou Z, et al. Multifunctional liquid crystal device for grayscale pattern display and holography with tunable spectral-response[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, 16(3): 2100591.
- [10] Lotfi F, Sang-Nourpour N, Kheradmand R. Plasmonic all-optical switching based on metamaterial/metal waveguides with local nonlinearity[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(1): 015201.
- [11] Song X Y, Zhang Z X, Liao H M, et al. Efficient unidirectional launching of surface plasmons by a cascade asymmetric-groove structure[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(12): 6777-6782.
- [12] Yang J, Xiao X, Hu C, et al. Broadband surface Plasmon polariton directional coupling via asymmetric optical slot nanoantenna pair[J]. *Nano Lett*, 2014, 14(2): 704-709.
- [13] Zhang F, Guo Y H, Pu M B, et al. Metasurfaces enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(10): 200366.  
张飞, 郭迎辉, 蒲明博, 等. 基于非对称光子自旋-轨道相互作用的超构表面[J]. *光电工程*, 2020, 47(10): 200366.
- [14] Fang C Z, Yang Q Y, Yuan Q C, et al. High-Q resonances governed by the quasi-bound states in the continuum in all-dielectric metasurfaces[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(6): 200030.
- [15] Nemati A, Wang Q, Ang N S S, et al. Ultra-high extinction-ratio light modulation by electrically tunable metasurface using dual epsilon-near-zero resonances[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(7): 200088.
- [16] Cui J H, Ma X L, Pu M B, et al. Extraordinary strong optical rotation in weak chiral metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(7): 190052.  
崔建华, 马晓亮, 蒲明博, 等. 弱手性超表面中的超常极化旋转[J]. *光电工程*, 2020, 47(7): 190052.
- [17] Tao J, You Q, Li Z L, et al. Mass-manufactured beam-steering metasurfaces for high-speed full-duplex optical wireless-broadcasting communications[J]. *Adv Mater*, 2022, 34(6): 220105-6

- 2106080.
- [18] Yue Z, Li J T, Li J, et al. Terahertz metasurface zone plates with arbitrary polarizations to a fixed polarization conversion[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, 1(3): 210014.
- [19] Zhang J Y, Dai J W, Yang J, et al. Invertible plasmonic spin-Hall effect at nanoscale based on U-shaped optical slot nanoantenna[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(34): 345201.
- [20] Meng C, Tang S W, Ding F, et al. Optical gap-surface Plasmon Metasurfaces for spin-controlled surface Plasmon excitation and anomalous beam steering[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(7): 1849–1856.
- [21] Shen Y J, Xie X, Pu M B, et al. Achromatic metalens based on coordinative modulation of propagation phase and geometric phase[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(10): 200237.  
申益佳, 谢鑫, 蒲明博, 等. 基于传输相位和几何相位协同调控的消色差超透镜[J]. *光电工程*, 2020, 47(10): 200237.
- [22] Luo X G, Pu M B, Guo Y H, et al. Catenary functions meet electromagnetic waves: opportunities and promises[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, 8(23): 2001194.
- [23] Zhang F, Zeng Q Y, Pu M B, et al. Broadband and high-efficiency accelerating beam generation by dielectric catenary metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2829–2837.
- [24] Dai C W, Yan C, Zeng Q Y, et al. A method of designing new Bessel beam generator[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(6): 190190.  
代成伟, 闫超, 曾庆玉, 等. 一种新型贝塞尔光束器件的设计方法[J]. *光电工程*, 2020, 47(6): 190190.
- [25] Song R R, Deng Q L, Zhou S L, et al. Catenary-based phase change metasurfaces for mid-infrared switchable wavefront control[J]. *Opt Express*, 2021, 29(15): 23006–23018.
- [26] Xu M F, Pu M B, Sang D, et al. Topology-optimized catenary-like metasurface for wide-angle and high-efficiency deflection: from a discrete to continuous geometric phase[J]. *Opt Express*, 2021, 29(7): 10181–10191.
- [27] Zhang F, Pu M B, Li X, et al. Extreme-angle silicon infrared optics enabled by streamlined surfaces[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(11): 2008157.
- [28] Guo Y H, Pu M B, Li X, et al. Ultra-broadband spin-controlled directional router based on single optical catenary integrated on silicon waveguide[J]. *Appl Phys Express*, 2018, 11(9): 092202.
- [29] Jin J J, Li X, Guo Y H, et al. Polarization-controlled unidirectional excitation of surface plasmon polaritons utilizing catenary apertures[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(9): 3952–3957.
- [30] Chen C, Mi J J, Chen P P, et al. Broadband spin-dependent directional coupler via single optimized metallic catenary antenna[J]. *Materials*, 2021, 14(2): 326.
- [31] Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. New York: Academic Press, 1985.
- [32] Chen P P, Chen C, Qin S S, et al. Efficient planar plasmonic directional launching of linearly polarized light in a catenary metasurface[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2020, 22(47): 27554–27559.
- [33] Hwang Y, Yang J K. Directional coupling of surface Plasmon polaritons at complementary split-ring resonators[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 7348.

## 作者简介



韩莹莹(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事微纳米光学研究。

E-mail: 2066254918@qq.com



【通信作者】石风华(1987-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为微纳米光学、光片荧光显微技术。

E-mail: fhshi@ahnu.edu.cn



【通信作者】石建平(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事微纳米光学、信息光学、集成光电子技术的研究。

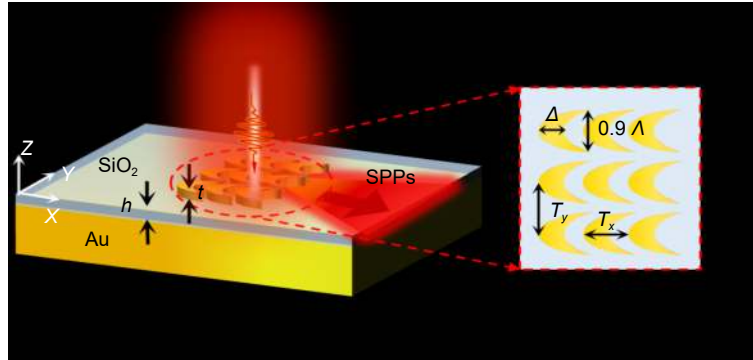
E-mail: jps51062@mail.ahnu.edu.cn

## 团队介绍

安徽师范大学微纳信息光子学研究团队现有固定研究人员 9 人, 其中教授 1 人, 副教授 3 人, 其他研究人员 5 人。团队负责人石建平教授, 博士毕业于中国科学院光电技术研究所, 曾获中国科学院院长奖优秀奖, 2010 年入选安徽省学术和技术带头人后备人选。团队主要针对表面等离激元 (Surface plasmon polaritons) 光子学开展研究工作, 研究内容包括 SP 定向传输控制、功能纳光子器件设计、表面晶格共振以及表面增强拉曼技术 (SERS) 等, 近五年承担了国家自然科学基金 3 项, 省部级项目 5 项, 在 *Nano Photonics*、*Optics Letter*、*Applied Physics Letter*、*Sensors and Actuators B: Chemical* 等期刊上发表论文 20 余篇, 获发明专利授权 6 项。

# SPPs directional excitation of linearly polarized light based on catenary nanoparticle metasurface

Han Yingying<sup>1</sup>, Chen Panpan<sup>1</sup>, Wang Man<sup>1</sup>,  
Huang Wanxia<sup>1,2</sup>, Shi Fenghua<sup>1,2\*</sup>, Shi Jianping<sup>1,2\*</sup>



Schematic diagram of the SPPs directional excitation based on catenary nanoparticle metasurface

**Overview:** Surface plasmon polaritons (SPPs) directional excitation is the basis for the development of on-chip integrated photonic systems, such as the super-resolution imaging, the nano lithography, and the high sensitivity biosensors. It is difficult for traditional directional structures, such as prisms, nano slits and grooves to satisfy the accurate phase-matching condition required for SPPs excitation, resulting in an unsatisfactory coupling efficiency, a low extinction ratio, and high loss and noise. In recent years, the directional excitation of surface plasmon polaritons based on the catenary metasurface began to be valued because of the continuous and linear geometric phase control ability. However, the research of SPPs directional excitation with linearly polarized light is less than that of circularly polarized light. In this paper, all excitation is explained according to the multi-level scattering theory and the Huygens-Fresnel principle. The simulation results show that at the resonance wavelength (836 nm), the SPPs directional excitation is effectively achieved due to the stronger electric dipole excited by SPPs resonances. At the same time, in the effective bandwidth range (820 nm~870 nm) of unit catenary nanoparticle, the electric dipole scattering intensity and spectral extinction ratio curve both show the trend of increasing first and then decreasing. Therefore, there is a positive correlation between the electric dipole scattering intensity and spectral extinction ratio curve. The above analysis shows that the dipole intensity is the main factor affecting the directional extinction ratio. The designed directional excitation of surface plasmon polaritons with linearly polarized light based on the catenary nanoparticle metasurface is effective. The peak extinction ratio is up to 27 dB (corresponding to the incident wavelength of 820 nm), and the bandwidth above 10 dB is about 47 nm (798 nm~845 nm). Therefore, these results are helpful for the research and development of the catenary multifunctional devices which has great potential in the design of SPP directional excitation devices. Besides, it is also a planar integrated device, which can provide new ideas for chip-level photonic device or system design. Moreover, the method in this paper is also suitable for circularly polarized light, therefore it can be referenced in the design of other multi-functional integrated photonic devices such as multi-directional beam splitters and polarization detectors.

Han Y Y, Chen P P, Wang M, et al. SPPs directional excitation of linearly polarized light based on catenary nanoparticle metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220105; DOI: [10.12086/oe.2022.220105](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220105)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61775002), and Anhui Provincial Natural Science Foundation (2108085MA23, 808235830016)

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China; <sup>2</sup>Anhui Province Key Laboratory of Photo-electronic Materials Science and Technology, Wuhu, Anhui 241000, China

\* E-mail: fshshi@ahnu.edu.cn; jps51062@mail.ahnu.edu.cn