

引用格式: LIU Hai, ZHAO Siyi, CHEN Cong, et al. Multifunctional Device Design Based on Composite Gratings and Gradient Supersurfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(9):0923002

刘海,赵思怡,陈聪,等.基于复合光栅和梯度超表面的多功能器件设计[J].光子学报,2023,52(9):0923002

基于复合光栅和梯度超表面的多功能器件设计

刘海^{1,2},赵思怡^{1,2},陈聪^{1,2},高鹏^{1,2},戴耀威^{1,2},赵佳明^{1,2},万寅辉^{1,2},
路祥宇^{1,2},王馨艳^{1,2},李雷^{1,2}

(1 中国矿业大学 教育部地下空间智能控制工程研究中心,徐州 221116)

(2 中国矿业大学 信息与控制工程学院,徐州 221116)

摘 要:设计了一种金属/介质/金属复合光栅与梯度超表面相结合的多功能器件。通过复合光栅的非对称结构实现光的非对称传输,当调制后的波矢量与表面等离极化激元的波矢量相匹配时,金属光栅激发的表面等离极化激元产生单波段光传输;通过梯度超表面实现光的异常反射。当 x 偏振态光波入射时,不同入射方向可在不同波段激发表面等离极化激元,由于上下光栅的不同周期和非对称的介质环境,光栅可分别在 1 128 nm 和 1 550 nm 处实现高透射率;另外在反向入射方向,该器件在 1 300~1 400 nm 整个波段表现为零吸收,反射率大于 90%,可作为反射器。当 y 偏振态光波入射时,在反向入射方向器件通过相位梯度超表面实现异常反射。该结构可为各种偏振相关的多功能器件和集成光学元件提供参考。

关键词:复合光栅;非对称传输;梯度超表面;表面等离极化激元;异常反射

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235209.0923002

0 引言

非对称传输器件近几年被广泛应用于光信号处理^[1]、传感^[2]、光二极管^[3]、光互连与复用^[4-5]等领域。与传统非对称器件^[6-8]相比,当前的人工材料通过打破空间对称性来实现非对称传输,包括光子晶体^[9]、超表面^[10]、手性超材料^[11-12]等,解决了传统器件体积庞大、不易集成的问题,为器件制造提供便利。超表面是指由亚波长人工层状材料组成的平面阵列,可实现对亚波长偏振、振幅、相位、极化方式的有效调控。多功能超表面可以分为两类,一类通过相变材料(如 GeSbTe、VO₂等)^[13-14]或金属-介电相变实现功能切换;另一类多功能的实现与光的偏振和不同传播方向有关^[15],例如相位梯度超表面,光入射到相位梯度超表面界面时,光的相位会发生变化,通过此相位变化可灵活操纵光的传输方向实现异常反射^[16]。将非对称传输器件与多功能超表面相结合,可为多功能器件和集成光学元件提供参考。

由于光对金属表面的强约束,基于表面等离极化激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)产生的局部场增强,可实现对光的调控与传输。2017年,LING Yonghong等提出了一种由梯度超表面和亚波长光栅组成的非对称传输器件,该器件通过上层的梯度超表面来激发 SPPs 实现非对称传输,下层光栅起到解耦的作用^[17]。2018年,XU Pengwei等提出一种具有两个错位平行金属光栅的光学二极管结构,实现非对称传输,在透射峰处具有高达 1 的高对比度^[18]。SPPs 在上下光栅狭缝的耦合强度不同导致双层非对称光栅结构在不同入射方向的透过率不同,因此可在不同波段实现高透射率而不相互影响。目前的研究大部分只能单一地实现光的非对称传输,面对多功能应用场景的需求,设计多功能集成器件成为发展趋势,因此将光栅与超表面结合,可在不同的入射和偏振态上实现不同功能。

基金项目:国家重点研发计划(No. 2021YFC2902704),国家自然科学基金(No. 51874301)

第一作者:刘海, lhai_hust@hotmail.com

通讯作者:李雷, llsiee@cumt.edu.cn

收稿日期:2023-02-23;录用日期:2023-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

本文提出一种不对称的金属/介质/金属(Metal/Dielectric/Metal, MIM)复合光栅和梯度超表面相结合的结构,通过改变光的偏振状态和入射方向,打破结构对称性,实现不同的功能。

1 模型建构与分析

1.1 结构设计

本文提出的复合金属-绝缘体光栅结构示意图如图1(a)所示。图1(b)为 $x-z$ 面截面图,图1(c)为虚线内单元结构图。该结构由上层光栅 G_1 、嵌入在二氧化硅(SiO_2)层的金属光栅 G_2 和下层相位梯度超表面 G_3 组成,可通过电子束光刻和高纵横比纳米压印技术制备^[19-20]。光栅层 G_1 的周期 $P_1=1\ 500\ \text{nm}$,光栅宽度 $w_1=700\ \text{nm}$,高度 $h_1=130\ \text{nm}$;光栅 G_1 和 G_2 之间的 SiO_2 层厚度 $t_1=90\ \text{nm}$ 。光栅层 G_2 的周期、宽度、高度分别为 $P_2=1\ 000\ \text{nm}$, $w_2=700\ \text{nm}$, $h_2=150\ \text{nm}$; G_1 和 G_2 光栅之间的横向相对位置 $\Delta=300\ \text{nm}$, G_2 与 G_3 的 SiO_2 间隔层厚度 $t_2=280\ \text{nm}$;下层位梯度超表面的超单元周期 $P_3=1\ 000\ \text{nm}$,高度 $h_3=100\ \text{nm}$ 。金属光栅所用材料为金属银(Ag),由Johnson and Christy数据^[21]可得,Ag的介电常数计算公式为

$$\epsilon_{\text{Ag}} = 4.0 - 54 \times \lambda^2 + i\lambda(0.38 + 0.71\lambda^2) \quad (1)$$

式中, λ 为光在真空中的波长。采用折射率 $n=1.46$ 的 SiO_2 作为间隔层。采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain Method, FDTD)方法研究电磁传输特性,在 x 和 y 方向上设周期性边界条件,在 z 方向上设置为完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)。

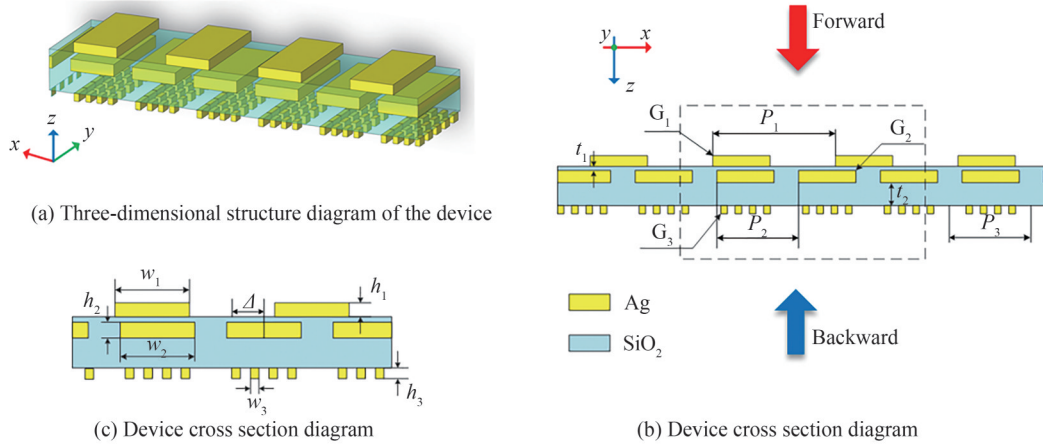


图1 器件结构

Fig.1 Device block diagram

通过对光栅进行优化,使其能为入射光提供波矢量增量来激发介质/光栅界面上的SPPs,为使激发态的SPPs能够穿透上层 SiO_2 膜,其厚度需要小于SPPs在介质中的穿透深度^[21]。当光波入射到金属光栅层时,在其表面发生衍射现象,根据光栅方程可得衍射光的波矢量在平行于界面的方向上的分量为

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_d} \sin \theta + \frac{2\pi m}{\Lambda} \quad (2)$$

式中, n_d 为电介质的折射率, θ 为光的入射角, m 为衍射阶数的整数, Λ 为光栅周期。从式(2)可知,光栅的衍射作用增强了衍射光波矢量,使平行于界面的衍射矢量分量等于界面的SPPs波矢量的模,即

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_d} \sin \theta + \frac{2\pi m}{\Lambda} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (3)$$

式中, $k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}}$ 为金属/介电界面处的SPPs波矢量的模,其中自由空间波矢量的模定义为 $k_0 = 2\pi/\lambda$, ϵ_m 为金属的介电常数即 ϵ_{Ag} 。当满足式(3)时,入射光与SPPs波相耦合而获得激发,产生表面等离子体共振现象。表面等离子体共振的波长为

$$\lambda_{\text{SPPs}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{\epsilon_d \epsilon_m}} \quad (4)$$

根据式(2)、(3),理论上,该器件在正向和反向入射时将分别在 1 506 nm 和 1 120 nm 处单向激发 SPPs;同时,SPPs的波长与周围电介质的介电常数相关,非对称的介质环境可实现 SPPs的单向激发。

底层光栅 G_3 为相位梯度超表面,通过相位梯度 $d\varphi/dx = 2\pi/\lambda$ 实现异常反射。 $d\varphi$ 和 dx 为每个超单元之间的相位差和超单元周期。根据广义斯涅尔定理(the Generalized Snell's Law)^[22],对于在两介质(折射率分别为 n_i 和 n)反射的入射平面波,入射角(θ_i)和反射角(θ_r)满足

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda}{2\pi n_i} \frac{d\varphi}{dx} \quad (5)$$

对于相位不连续的超表面,当平面波反向入射时($\theta_i=0$),超表面上方的介质为空气($n_i=1$),异常反射角 θ_r 可表示为

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}\right) \quad (6)$$

由式(6)可得当 $\lambda=920$ nm, $dx=P_3=1\ 000$ nm, $d\varphi=2\pi$ 时,异常反射角 $\theta_r=67^\circ$ 。由于入射波长小于超单元的周期,不会激发出 SPPs,结构只允许反射,透射率很低。图 2(a)为超表面超单元的单元结构,其中上层是宽度 $w_3=80$ nm,高度为 $h_3=100$ nm 的 Ag 纳米结构,中间层是高度为 t_2 的 SiO_2 间隔层,底部是宽度 $P=175$ nm,长度 $P_y=300$ nm,高度为 h_2 的 Ag 光栅。当入射光垂直照射单元结构时,顶部 Ag 纳米结构与底部 Ag 光栅之间会产生反平行电流循环,产生特定波长的磁场共振,在 SiO_2 层内部产生强局域电场能量,这种共振与顶部 Ag 纳米结构的尺寸有关,因此可以通过改变顶层 Ag 纳米结构的长度 L 来调节每个单元的反射相位延迟,可得 $L_1=156$ nm, $L_2=191$ nm, $L_3=215$ nm, $L_4=285$ nm。图 2(b)为通过调整顶层纳米结构长度 L ,反射相位与反射率的变化,四个单元反射率都接近 0.9,反射相位以 $\pi/2$ 的间隔增加,图 2(c)为一个超单元的 x - y 截面图。

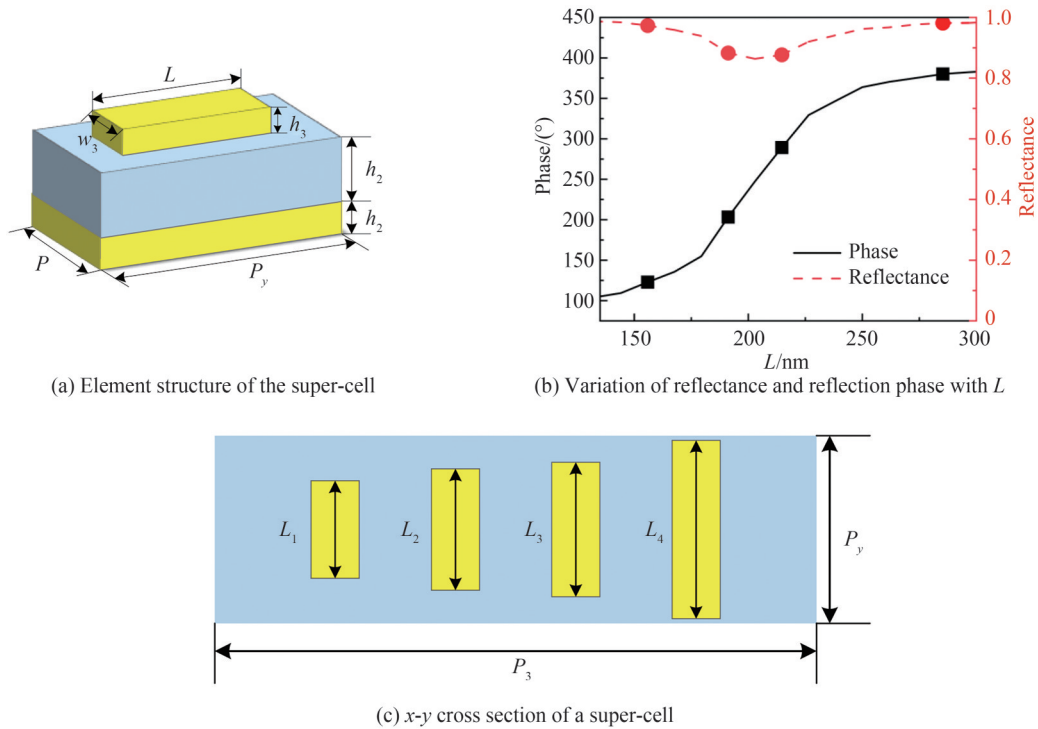


图 2 超单元结构与顶层 Ag 纳米结构的长度 L 对反射率和反射相位的影响

Fig.2 Effect of super-cell structure and length of the top Ag nanostructure L on reflectivity and reflection phase

1.2 结构优化

为了得到非对称传输特性的最佳性能,对该器件各参数进行优化以增强光束和光栅之间的相互作用^[23]。图3为光栅横向位置 Δ 对透射光谱的影响,当 $\Delta=0$ 时,正向透射率和反向透射率均较低。当光正向入射时正向透射率 T_f 仅为0.52,反向透射率 T_b 接近0.4,因此无法实现光的单向传输;当光反向入射时,反向透射率下降,光谱变宽,透射峰红移且在1480 nm的位置出现第二个透射峰。 Δ 的变化改变了耦合效应的强度,导致透射峰的分裂,出现双峰甚至多峰,拓宽透射光谱^[24]。通过图3(d)、(f)电场分布 E_z 对比,该结构虽然可以激发很少的SPPs,但耦合效率低,因此反向透射率不高。该结果证明了高透射率依赖于两层光栅之间的波导共振,光栅横向位置 Δ 的变化使中间 SiO_2 层的场分布发生变化。当 $\Delta=550$ nm时,正向透射率和反向透射率都下降,正向透射峰发生红移。通过图3(g)、(e)的电场分布 E_z 的对比,该结构在正向透射峰处几乎没有SPPs的激发,光是通过金属缝隙透过结构。当 Δ 变化时,双层光栅 G_1 、 G_2 的有效折射率和通过两个光栅亚波长沟槽的光的相对相位也会发生变化,导致共振波长和透射光谱改变。

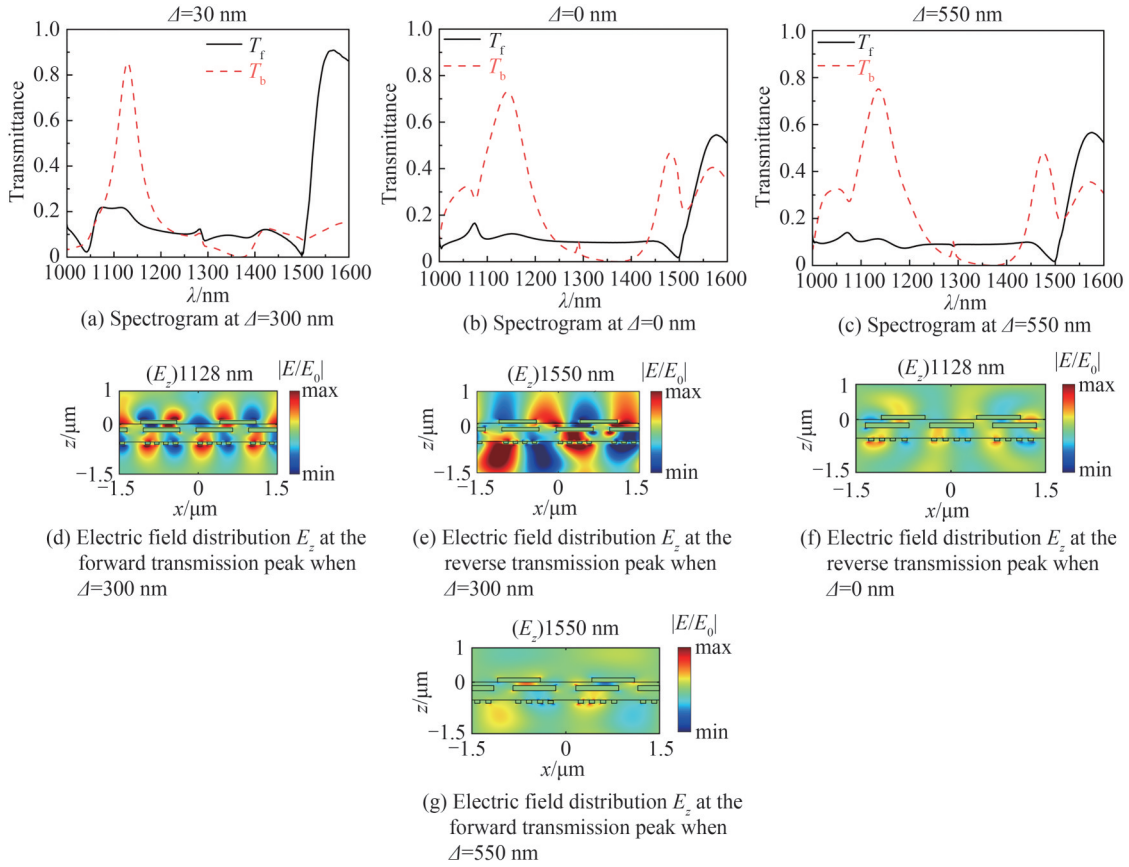
图3 光栅横向相对位置(Δ)对透射光谱的影响Fig.3 Effect of relative position of grating transverse (Δ) on transmission spectrum

图4、图5分析了上光栅 G_1 在不同参数下的透射光谱。图4为上光栅在不同宽度($w_1=600$ nm、700 nm、800 nm和900 nm)下的透射光谱,随着上光栅宽度的增加,正/反透射率呈先增加后减小的趋势,并在 $w_1=700$ nm处为最大值,此时的非对称传输特性为最佳。这与上光栅的填充因子 $f(f=w_1/P_1)$ 有关,当 f 变大时,正向光和反向光都被金属光栅大量阻挡,因此透射率降低,当 f 变小时,光栅之间的缝隙变大,共振作用减弱导致透射率降低,因此采用适当的填充因子 f 可以获得较大的透射率。图5为上光栅在不同高度($h_1=80$ nm、130 nm、160 nm和200 nm)下的透射光谱,随着上光栅高度的增加,正向透射率呈先增加后减小的趋势,并在 $h_1=130$ nm处为最大值,根据光栅中的槽深效应,随着光栅高度的减小,入射光与光栅的相互作用减弱,吸收阻尼降低导致共振峰振幅增加^[25],但 h_1 的高度太低也会导致光栅间共振减弱,透射峰降低;反向透射率随着 h_1 的增大基本不变,但透射峰发生红移,峰的位置与式(3)算出的结果偏差越来越大。因此,上光栅高度 $h_1=130$ nm时,器件的非对称传输特性最佳。光栅 G_1 和 G_2 之间的 SiO_2 间隔层厚度 t_1 对结构的透射光谱也会产生影响。

图6为间隔层SiO₂在不同厚度($t_1=85\text{ nm}$ 、 90 nm 、 95 nm 和 105 nm)下的透射光谱,随着厚度 t_1 的变化,正/反向透射率都在 $t_1=90\text{ nm}$ 处达最大值,且在该厚度下透射峰的位置与式(3)计算出的结果偏差最小。因此,间隔层SiO₂厚度 $t_1=90\text{ nm}$ 时,器件的非对称传输特性最佳。这是因为当SiO₂间隔层过薄会导致光栅间的近场耦合增强,光栅的辐射损耗增加,透射率降低;而间隔层过厚会使近场耦合减弱,延长光在结构中的传输距离,削弱光栅间的电磁作用,透射率降低^[18]。因此采用适当的间隔层厚度 t_1 可以获得较好的非对称传输特性。

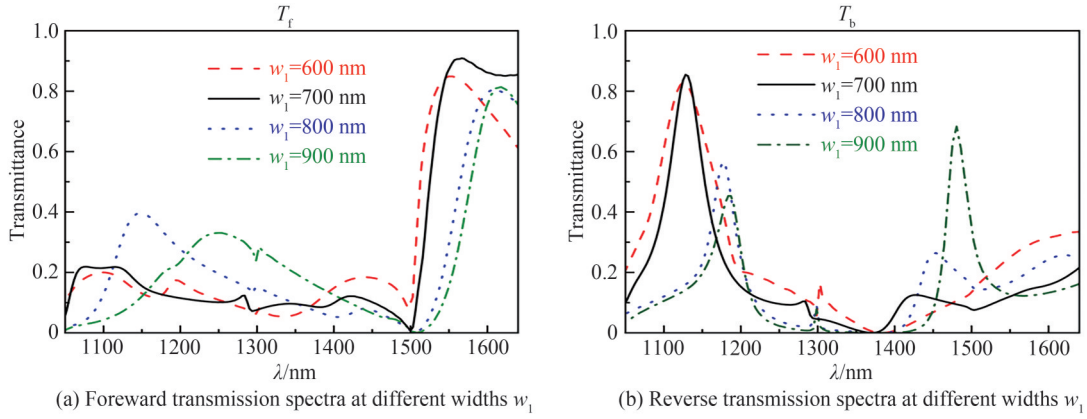


图4 该结构上光栅在不同宽度 w_1 下的透射光谱
Fig.4 Transmission spectra of gratings at different widths w_1 on this structure

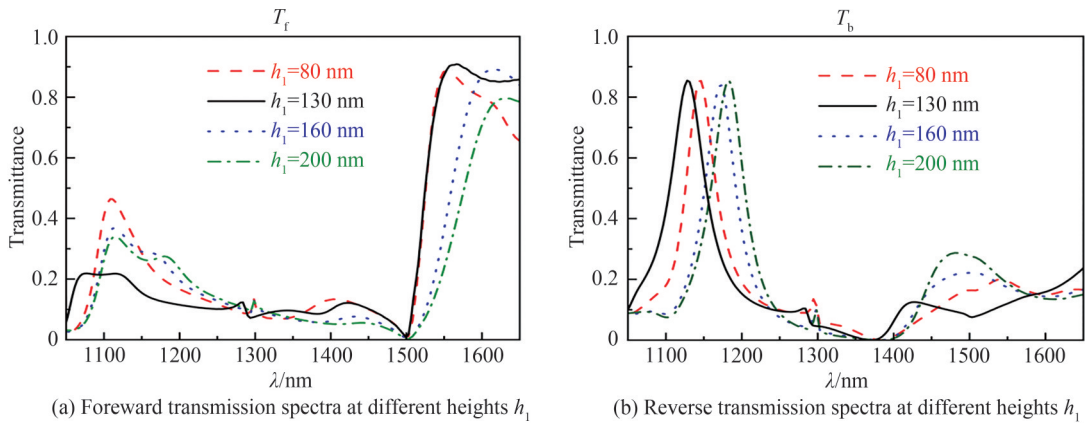


图5 该结构上光栅在不同高度 h_1 下的透射光谱
Fig.5 Transmission spectra of gratings with different heights h_1 on this structure

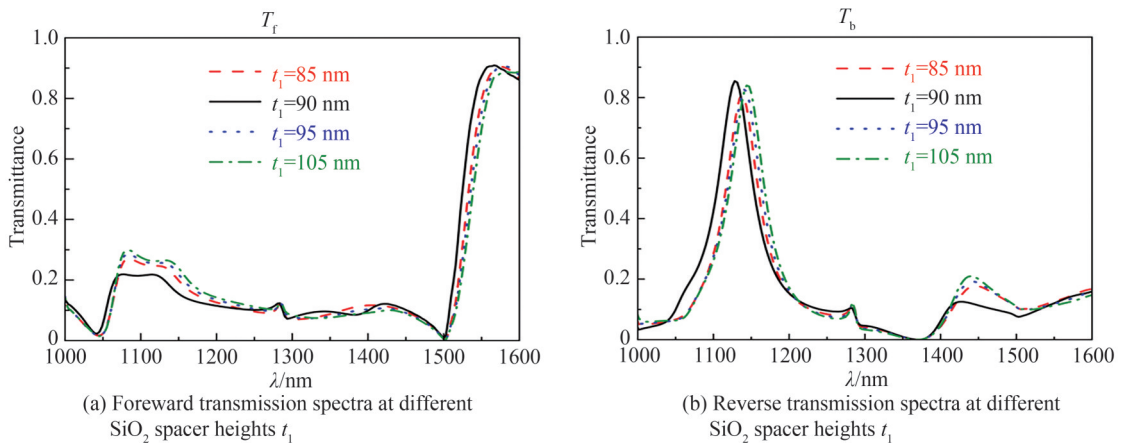


图6 该结构在SiO₂间隔层不同高度 t_1 下的透射光谱
Fig.6 Transmission spectra of this structure at different SiO₂ spacer heights t_1

2 结果与讨论

2.1 x 偏振态光波入射

图7所示为 x 偏振态光波入射时器件的正向和反向透射光谱,在正向入射方向,SPPs在1550 nm处被单向激发,标记为 P_f ,在此波长的正向透射率可达0.9;在反向入射方向,SPPs在1128 nm处被单向激发,标记为 P_b ,在此波长的反向透射率可达0.86。 T_f 和 T_b 分别代表正向入射和反向入射时的透射率,在不同入射方向上下光栅不能激发同波段的SPPs,在正向激发波段,反向传输会被抑制,反之亦然。如图7所示,在 P_f 处的反向透射率和在 P_b 处的正向透射率都很低。由于上下光栅的不同周期和入射界面的介电常数不同,SPPs激发的波段和波长也不同。在正向入射方向, G_1 光栅的周期 $P_1=1500$ nm,此时入射界面为空气,根据式(3)计算出SPPs在 $\lambda=1506$ nm处激发,与仿真结果基本吻合;当在反向入射方向, G_2 光栅的周期 $P_2=1000$ nm,入射界面为 SiO_2 ,计算可得反向入射时SPPs在 $\lambda=1120$ nm处激发,与仿真结果吻合。

为了了解SPPs在不同波段单向激发,模拟了两个波段的电场分布。如图8(a)所示,当光正向入射通过器件时,SPPs将在上层空气/ G_1 光栅界面被激发,穿透上 SiO_2 层并解耦到自由空间,从而达到高传输率。由式(4)可 $\lambda=1550$ nm处所激发的SPPs的波长 $\lambda_{\text{SPPs}}=1550$ nm,这与图8(b)所示 $z=-1500$ nm处电场分布图中的结果基本吻合。如图8(c)所示,此时光可以透过器件传输到下部空间。图8(d)表明在 $\lambda=1500$ nm处,光反向照射时,由于光栅 G_2 在此波长不能有效激发SPPs,因此很少的光能透过器件,此处的反向透射率低。图9为该结构在1128 nm处的电场分布。图9(a)~(c)为光反向照射时激发SPPs的共振模式,与光正向入射不同的是当光反向入射时SPPs在 SiO_2/G_2 光栅界面被激发,由于入射波长小于梯度超表面 G_3 的周期, G_3 层不会激发SPPs,同样由式(4)得 $\lambda=1128$ nm处所激发的 $\lambda_{\text{SPPs}}=1000$ nm与仿真结果基本吻合,此时也是 $z=-1500$ nm处的电场分布。图9(d)为正向入射时 E_x 电场分布,大部分光被反射,在此处的正向透射率低。

图10为 x 偏振态光波反向入射时在1300~1400 nm波段的反射率(Reflectance)、透射率(Transmittance)、吸收率(Absorption)光谱,在此波段该器件的反射率都大于0.9,透射率小于0.1,吸收率接近于0。图10中还包含此波段中一个波长的电场分布 E_z ,在此波长下光被全部反射,与光谱图一致,因此在此波段该器件可作为反射器。

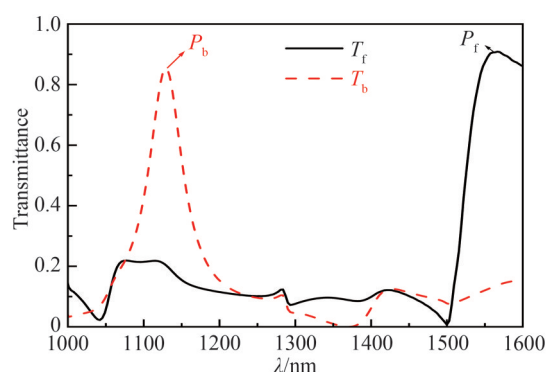
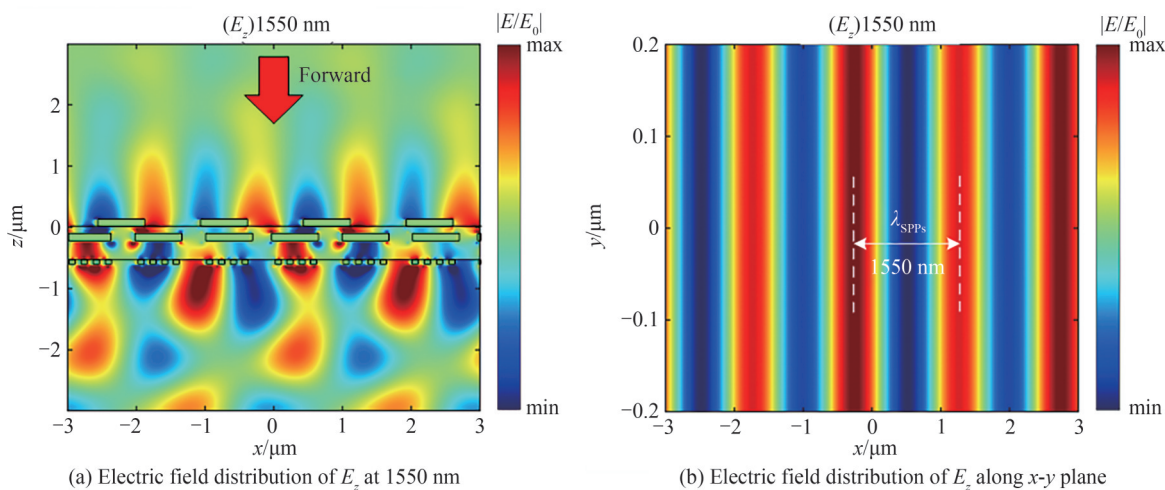


图7 当 x 偏振态光波入射时器件的正向和反向透射光谱
Fig.7 Forward and reverse transmission spectra of the device when an x -polarized state light wave is incident



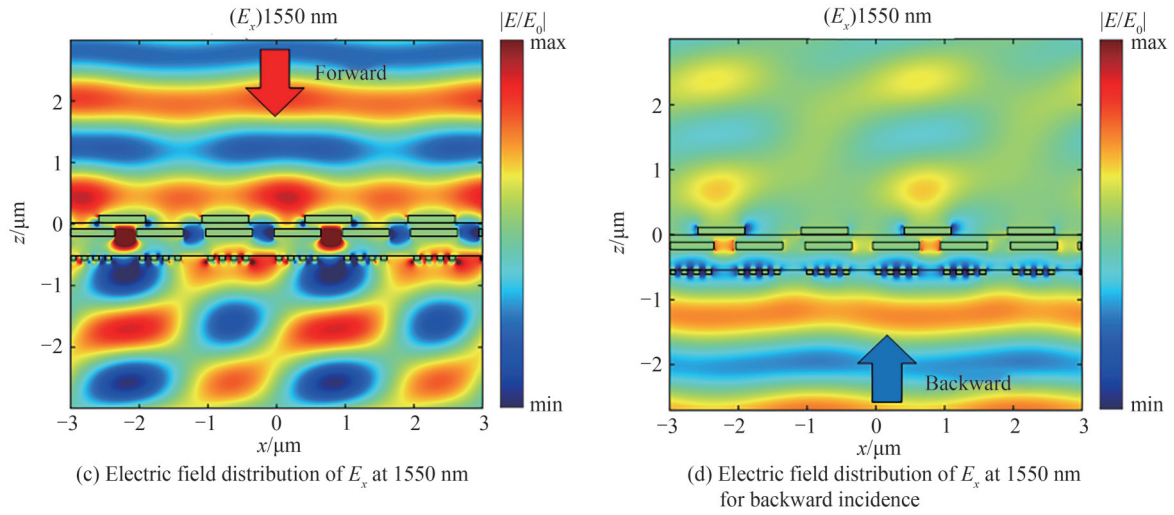


图8 当光正反向入射时,该结构在1550 nm处的电场分布
Fig.8 The electric field distribution of the structure at 1550 nm when light is incident in the forward and reverse directions

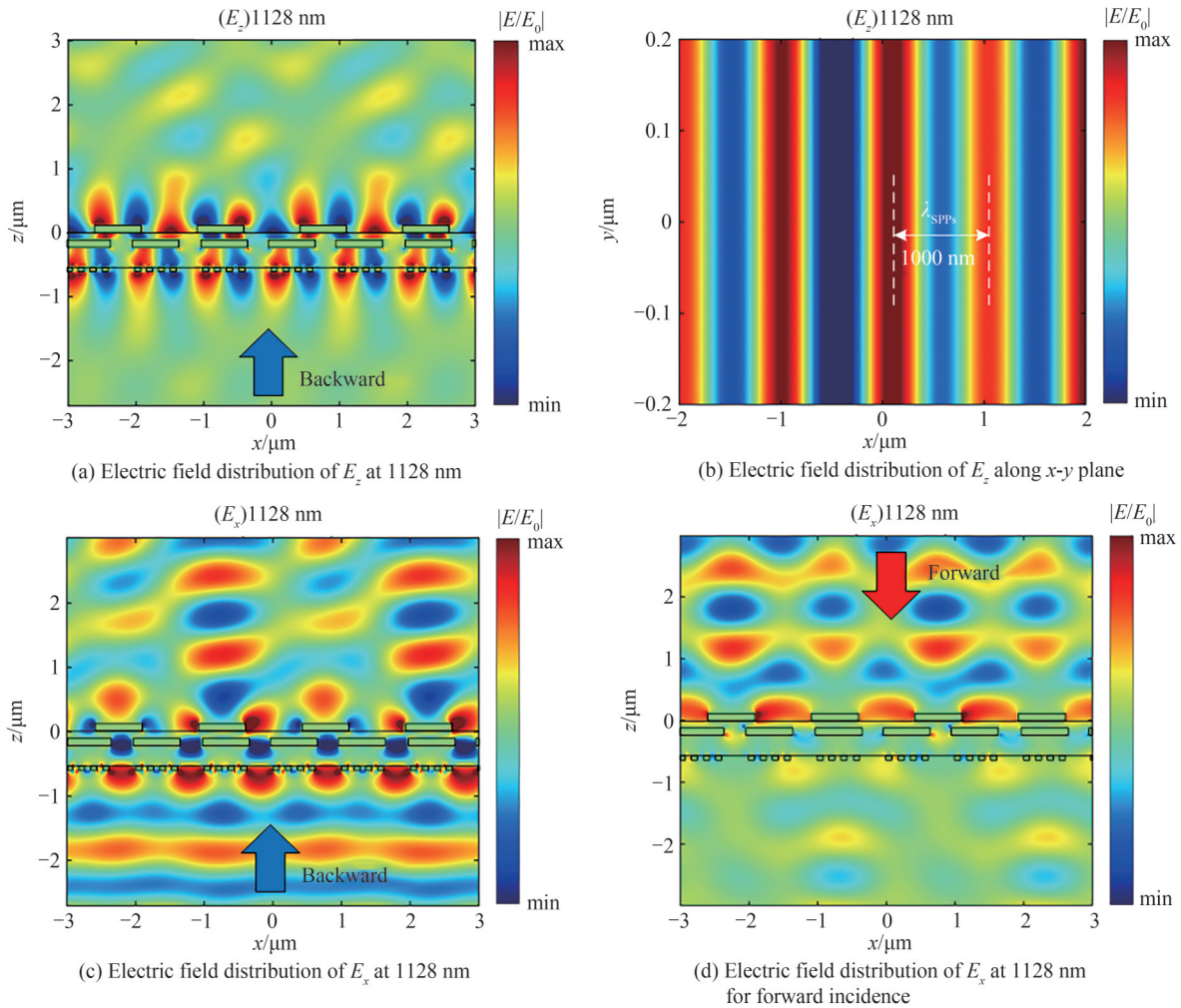


图9 当光正反向入射时,该结构在1128 nm处的电场分布
Fig.9 The electric field distribution of the structure at 1128 nm when light is incident in the forward and reverse directions

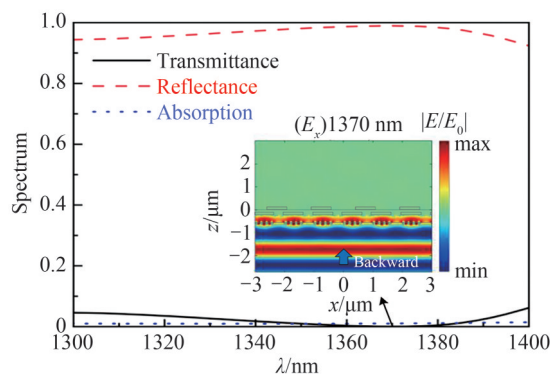


图10 x 偏振态光波反向入射时在1300~1400 nm波段的反射、透射和吸收光谱及电场分布 E_x
Fig.10 The reflectance, transmittance and absorption spectra and electric field distribution E_x at 1300~1400 nm band when x -polarized light wave is reverse incident

2.2 y 偏振态光波入射

为验证非对称传输现象仅在 x 偏振态光波入射时出现,对 y 偏振态光波入射器件时在不同入射方向的透射光谱进行仿真,结果如图11所示。从图可得当 y 偏振态光波入射时,器件不会出现非对称传输现象,这是由于SPPs场分量在金属/电介质边界达到最大值,并在金属两端的电介质中呈指数级衰减。在可见光和红外光中,大多数金属的介电常数实部为负,因此,金属的介电常数与周围电介电常数不同,只有 x 偏振态光波才能有效激发SPPs^[26]。

鉴于 x 偏振态光波入射时光栅的非对称传输特性和反射特性已经被广泛研究,因此,利用另一个波段的光照射底层的相位梯度超表面实现异常反射,以实现器件的多功能性。

当 y 偏振态光波入射时,在反向入射方向,光直接照射相位梯度超表面,根据广义斯涅尔定理,为了形成相位不连续的超表面使超单元中每个单元结构底层Ag纳米结构的长度 L 不同,形成反射相位延迟,当光照射时产生异常反射现象。图12模拟了归一化散射场

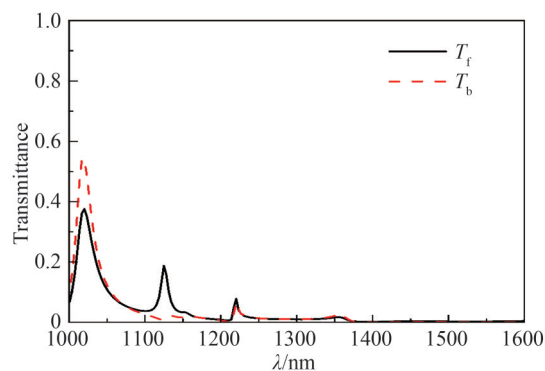
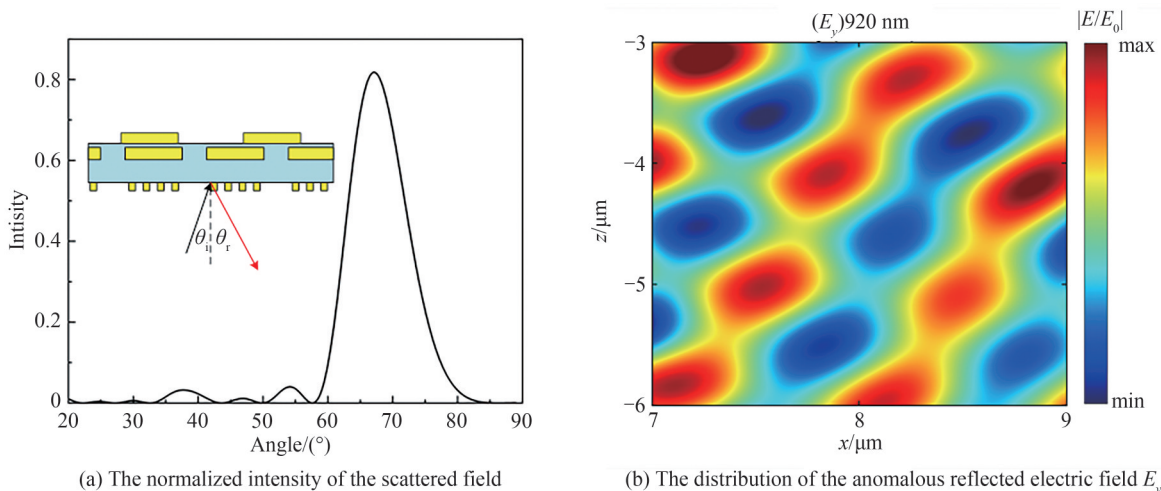


图11 当 y 偏振态光波入射时器件的正向和反向透射光谱
Fig.11 Forward and reverse transmission spectra of the device when a light wave in the y -polarized state is incident



(a) The normalized intensity of the scattered field

(b) The distribution of the anomalous reflected electric field E_y

图12 在920 nm处 y 偏振态光波反向入射时的异常反射现象
Fig.12 Abnormal reflection phenomenon when y -polarized light waves are reverse incident at 920 nm

强度 $P(\theta_r, \lambda)/P_0$ 和异常反射电场分布 E_y 。这里的工作波长为 920 nm,入射角为 0° ,当光垂直照射 ($\theta_i = 0^\circ$) 时,入射波到异常反射的转换效率大于 80%,异常反射角 ($\theta_r = 67^\circ$) 与式(6)计算结果一致。

3 结论

本文提出了一种 MIM 结构和梯度超表面相结合的多功能器件。该结构可以实现多个功能:当 x 偏振态光波入射时,由于光的入射方向和非对称的介质环境可以实现 SPPs 的单向激发,进一步实现非对称传输功能;在正向入射方向, SPPs 在 1 550 nm 处激发,正向透过率为 0.9,在反向入射方向, SPPs 在 1 128 nm 处激发,反向透过率为 0.86;在 1 300~1 400 nm 波段,该器件反射率大于 0.9,透射率小于 0.1,吸收率接近于 0,可作为反射器,但在该波段当光垂直入射到光学器件表面时,会发生正反射现象,可能会对入射光路上的器件造成损伤,为了减少反射损失,可以采用多种方法,例如使用抗反射涂层、调整入射角度等。当 y 偏振态光波入射时,在反向入射方向,设计了一个梯度超表面,由于一个超单元中每个单元的 Ag 纳米结构长度不同,形成反射相位延迟,当光照射时产生反射角为 67° 的异常反射现象。为了解决非对称传输和异常反射器件功能单一的问题,将 SPPs 单向激发和广义斯涅尔理论相结合实现多功能,拓展了该器件的应用场景,为小型化、多功能集成光学器件的设计提供了便利。

参考文献

- [1] LUAN J, HUANG L R, LING Y H, et al. Dual-wavelength multifunctional metadevices based on modularization design by using indium-tin-oxide[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 361.
- [2] WANG J C, FENG H L, ZHANG J Y, et al. Plasmonic band-stop MIM waveguide filter based on bilateral asymmetric equilateral triangular ring[J]. Optik, 2022, 265: 169535.
- [3] LI X F, FENG R, DING W Q. Extremely high contrast asymmetric transmission with linear tunability in chiral metamaterials[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2018, 51(14): 145304.
- [4] CAKMAKYAPAN S, SEREBRYANNIKOV A E, CAGLAYAN H, et al. Spoof-plasmon relevant one-way collimation and multiplexing at beaming from a slit in metallic grating [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26636-26648.
- [5] SOUNAS D L, ALU A. Non-reciprocal photonics based on time modulation [J]. Nature Photonics, 2017, 11(22): 774-783.
- [6] POPKOV A F, FEHNDRICH M, LOHMEYER M, et al. Nonreciprocal TE-mode phase shift by domain walls in magneto-optic rib waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(20): 2508-2510.
- [7] SHOJI Y, MIZUMOTO T, YOKOI H, et al. Magneto-optical isolator with silicon waveguides fabricated by direct bonding[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(7): 071117.
- [8] SHOJI Y, MIZUMOTO T. Magneto-optical non-reciprocal devices in silicon photonics[J]. Science and Technology of Advanced Material, 2014, 15(1): 014602.
- [9] SEREBRYANNIKOV A E, CAKMAK A O, OZBAY E. Multichannel optical diode with unidirectional diffraction relevant total transmission[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 14980-14990.
- [10] SHEN B, POLSON R, MENON R. Broadband asymmetric light transmission via all-dielectric digital metasurfaces[J]. Optical Express, 2015, 23(16): 20961-20970.
- [11] LIU D Y, ZHAI Y M, YAO L F, et al. Asymmetric transmission with double bands based on chiral twisted double-split-ring resonators[J]. Optics Communications, 2014, 323: 19-22.
- [12] LIU D J, XIAO Z Y, MA X L, et al. Asymmetric transmission of chiral metamaterial slab with double L resonators[J]. Optics Communications, 2015, 338:359-365.
- [13] AHMADIVAND A, GERISLIOGLU B, SINHA R, et al. Optical switching using transition from dipolar to charge transfer plasmon modes in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ bridged metallodielectric dimers[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42807.
- [14] YU S W, LI Z C, LIU W W, et al. Tunable dual-band and high-quality-factor perfect absorption based on VO_2 -assisted metasurfaces[J]. Optics Express, 2021,29(20): 31488-31498.
- [15] HAN J Z, CHEN R S. Broadband metasurface for polarization conversion and asymmetric transmission at X-band [C]. Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2020: 232-233.
- [16] SUN S L, YANG K Y, WANG C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [17] LING Y H, HUANG L R, HONG W, et al. Asymmetric optical transmission based on unidirectional excitation of surface plasmon polaritons in gradient metasurface[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13648-13658.
- [18] XU P W, LV X F, CHEN J, et al. Dichroic optical diode transmission in two dislocated parallel metallic gratings [J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13: 392.

- [19] LIU X Y, GAO J B, GAO J S, et al. Microcavity electrodynamic of hybrid surface plasmon polariton modes in high-quality multilayer trench gratings[J]. *Light-Science & Applications*, 2018, 7: 14.
- [20] HONMA H, MITSUDOME M, ITOH S, et al. Fabrication of free-standing subwavelength metal-insulator-metal gratings using high-aspect-ratio nanoimprint techniques[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(6): 06GP20.
- [21] BARNES W L. Surface plasmon-polariton length scales: a route to sub-wavelength optics[J]. *Journal of Optics Pure and Applied Optics*, 2006, 8(4): S87-S93.
- [22] JI R N, JIN C, SONG K, et al. Design of multifunctional janus metasurface based on subwavelength grating [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(4): 1034.
- [23] FU T, WANG D F, YANG Z Q, et al. Steering smith-purcell radiation angle in a fixed frequency by the Fano-resonant metasurface[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26983-26994.
- [24] CHENG C, CHEN J, WU Q Y, et al. Controllable electromagnetic transmission based on dual-metallic grating structures composed of subwavelength slits[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(11): 111111.
- [25] BA C F, HUANG L R, LIU W B, et al. Narrow-band and high-contrast asymmetric transmission based on metal-metal-metal asymmetric gratings[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25107-25118.
- [26] WANG X F, LU Z W, WANG T S, et al. Grating diffractive behavior of surface plasmon wave on meta-surface [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 60-73.

Multifunctional Device Design Based on Composite Gratings and Gradient Supersurfaces

LIU Hai^{1,2}, ZHAO Siyi^{1,2}, CHEN Cong^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, DAI Yaowei^{1,2}, ZHAO Jiaming^{1,2},
WAN Yinhuai^{1,2}, LU Xiangyu^{1,2}, WANG Xinyan^{1,2}, LI Lei^{1,2}

(1 *The Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China*)

(2 *School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China*)

Abstract: Most of the current research can only realize the asymmetric transmission of light singly, in the face of the demand for multifunctional application scenarios, the design of multifunctional integrated devices has become a development trend. Therefore, the combination of grating and super-surface, which can realize different functions in different incidence and polarization states, is a multifunctional device combining a metal/medium/metal composite grating and a gradient super-surface structure. The asymmetric transmission of light is realized through the asymmetric structure of the composite grating, and when the modulated wave vector matches the wave vector of the Surface Plasmon Polaritons (SPPs), the SPPs excited by the metal grating produce single-band light transmission, and the anomalous reflection of light is realized through the gradient hypersurface. When an x -polarized light wave is incident, the SPPs are unidirectionally excited at 1 550 nm in the forward-incidence direction, and the forward transmittance at this wavelength is up to 0.9. In the reverse-incidence direction, the SPPs are unidirectionally excited at 1 128 nm, and the backward transmittance at this wavelength is up to 0.86. Due to the different periods of the upper and lower gratings and the difference in permittivity at the incident interfaces, the surface-iso-polarized excitations can be excited in a single-band light transmission. The upper and lower gratings cannot excite SPPs in the same band at different incidence directions, and the reverse transmission is suppressed in the forward excitation band and vice versa. In order to obtain the best performance of the asymmetric transmission characteristics, the parameters of the device are optimized to enhance the interaction between the beam and the grating. The effect of the grating transverse position on the transmission spectrum is investigated. Changes in the grating transverse position alter the strength of the coupling effect, leading to the splitting of the transmission peaks, the emergence of double peaks or even multiple peaks, and the broadening of the transmission spectrum, and the effective refractive index of the double-layered grating and the relative phases of the light passing through the sub-wavelength grooves of the two gratings are also varied, leading to changes in the resonance wavelengths and the transmission spectra. The changes in the transmission spectra of the upper and lower metal gratings and the intermediate SiO₂ film under different parameters are also investigated. In addition, in the direction of reverse incidence, the device exhibits zero absorption in the entire band from

1 300 to 1 400 nm, and the reflectivity is greater than 0.9, which can be used as a reflector. In order to verify that the asymmetric transmission phenomenon occurs only when x -polarized light waves are incident, the transmission spectra of y -polarized light waves incident on the device in different incident directions are also simulated, and it is found that the device does not exhibit asymmetric transmission when y -polarized light waves are incident, due to the fact that the SPPs field component reaches its maximum at the metal/dielectric boundary, and decays exponentially in the dielectrics at the two ends of the metal. In visible and infrared light, the real part of the permittivity of most metals is negative, so that the permittivity of the metal is different from that of the surrounding permittivity, and only light waves in the x -polarized state can efficiently excite the SPPs. Given that the asymmetric transmission properties and reflection properties of gratings at the incidence of light waves in the x -polarized state have been extensively studied, the anomalous reflections are achieved by irradiating the underlying phase-gradient hypersurfaces with light from the other wavelength band in order to realize the versatility of the device. When the y -polarized state light wave is incident, in the reverse incidence direction, the light directly irradiates the phase gradient super-surface, and according to the Generalized Snell's Law, in order to form a phase discontinuous super-surface to make the length of the underlying Ag nanostructures of each unit structure in the super-unit is different, which forms the reflective phase delay, and produces the phenomenon of anomalous reflections when the light is irradiated. To solve the problem of asymmetric transmission and single function of anomalous reflection devices, unidirectional excitation of SPPs and the Generalized Snell's Law are combined to realize multifunctionality, which provides a reference for a variety of polarization-related multifunctional devices and integrated optical components.

Key words: Composite grating; Asymmetric transmission; Gradient metasurface; Surface plasmon polaritons; Abnormal reflection

OCIS Codes: 230.3120; 050.2770; 240.6680; 120.5700; 130.3120