

宽入射角度偏振不敏感高效异常反射梯度超表面

刘桐君 习翔 令永红 孙雅丽 李志伟 黄黎蓉

Polarization-insensitive and broad-angle gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection

Liu Tong-Jun Xi Xiang Ling Yong-Hong Sun Ya-Li Li Zhi-Wei Huang Li-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 237802 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.237802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究

[Study on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber](#)

物理学报.2015, 64(11): 117801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.117801>

用最小结构单元频率选择表面实现大入射角宽频带的透波材料

[Wideband and large incident angle wave transparent material based on frequency selective surface with miniaturized elements](#)

物理学报.2014, 63(13): 137803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137803>

基于加权实数编码遗传算法的超材料优化设计

[Optimization of metamaterial based weighted real-coded genetic algorithm](#)

物理学报.2014, 63(8): 087804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.087804>

基于集总元件和负微分元件的有源可调谐超材料传输线

[Active tunable metamaterial transmission line based on lumped elements and negative differential devices](#)

物理学报.2014, 63(2): 027802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.027802>

基于负微分电阻碳纳米管的太赫兹波有源超材料特性参数提取

[Extraction of effective constitutive parameters of active terahertz metamaterial with negative differential resistance carbon nanotubes](#)

物理学报.2013, 62(3): 037806 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037806>

宽入射角度偏振不敏感高效异常反射梯度超表面*

刘桐君^{1)2)†} 习翔¹⁾ 令永红¹⁾ 孙雅丽¹⁾ 李志伟¹⁾ 黄黎蓉^{1)‡}

1) (华中科技大学武汉光电国家实验室、光学与电子信息学院, 武汉 430074)

2) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2015年7月14日收到; 2015年8月15日收到修改稿)

偏振不敏感超表面在实际应用中具有重要意义, 本文提出了一种光通信波段的、对偏振不敏感的异常反射式梯度超表面, 这种超表面对于 x -偏振和 y -偏振入射光都能够实现高效率的异常反射, 表现出偏振不敏感特性, 为解决传统反射式超表面的偏振敏感性问题提供了一种新途径. 它采用金属 (Au)-绝缘层 (SiO_2)-金属 (Au) 结构, 超表面的超晶胞由五个各向同性的、尺寸不同的十字形基本结构单元组成. 仿真结果表明, 这种超表面结构对不同线偏振入射平面光波有几乎相同的相位和振幅响应; 合理的选取五个基本结构单元的尺寸, 在一个超晶胞内实现了 2π 相位的覆盖, 反射光波阵面畸变小, 而且反射光都集中到异常反射级次, 在工作波长 1480 nm 处具有较高的异常反射率 ($\sim 70\%$). 此外, 这种结构的超表面在 -30° — 0° 的宽入射角度范围内都具有偏振不敏感的异常反射特性. 在光通信、光信号处理、显示成像等领域具有潜在的应用前景.

关键词: 梯度超表面, 偏振不敏感, 宽入射角, 异常反射

PACS: 78.67.Pt, 42.25.Bs, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.64.237802

1 引言

超表面是一种二维超材料^[1-6], 它能够在亚波长传播距离范围内使光的属性发生突变, 由此可以灵活有效地操纵入射光波的相位、振幅、偏振、传播模式等特性^[1-3]. 因为具有丰富独特的物理特性以及平面化、小型化的特点, 超表面已经被用来设计和制作多种光学器件, 包括涡旋光相位片^[1,7]、平面透镜^[8,9]、全息相位片^[10]、偏振转换器件^[1]、完美吸收器^[11]等; 利用超表面可以任意控制入射电磁波的偏振态, 如偏振旋转、偏振转换、偏振分光^[12,13]等, 不同于以往控制偏振态的体材料, 超表面更容易实现器件的小型化; 此外, 超表面的工作波长覆盖了可见光到微波波段.

在光通信领域, 超表面可以用来设计工作在光通信波段的光开关^[14]、空间光调制器^[15]以及

波分复用器/解复用器^[16]等. 然而, 大部分的异常折/反射超表面结构对偏振依赖性较强^[17-20], 这是因为天线的尺寸只在某一偏振方向发生改变, 而产生的相位梯度也是对某一偏振方向的入射光束是敏感的. 这样就使得偏振光束的正交方向的信息丢失, 增加光通信系统的误码率, 因此需要解决偏振敏感问题.

基于离散梯度相位超表面, Pors 等设计了工作波长在可见光波段的一字形反射式偏振不敏感超表面, 并设计了偏振光分束器^[21]; 在太赫兹波段, Paul 等设计了十字形结构阵列的电可调谐超材料, 通过施加偏压实现对任意正入射偏振光的透过率的独立操控^[22]; 在微波波段, 崔铁军教授课题组采用正交的 I 形状的金属天线结构阵列超表面, 解决了偏振敏感性问题^[23], 并设计了四种不同功能的器件. 然而在光通信波段利用这种结构的超表面, 其制作工艺的难度加大, 会导致器件的性能下降.

* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20120142110064) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tongjun_liu@163.com

‡ 通信作者. E-mail: lrhuang@mail.hust.edu.cn

本文采用简单的十字形结构组成的超晶胞, 设计了光通信波段高效异常反射式偏振不敏感超表面, 它可以在较宽的入射角度范围内工作. 为解决超表面的偏振依赖性问题提供了一种设计方法, 摆脱了传统超材料的入射角度敏感特性. 此外, 这种结构的超表面具有高效的异常反射效率, 在光通信器件中具有潜在的应用价值.

2 理论分析与结构设计

金属等离子体谐振腔 (Gap Plasmon Resonator)^[21], 即亚波长结构的金属-绝缘层-金属谐振腔 (M-I-M Resonator), 被广泛地应用于宽带高

反射率梯度相位超表面. 通过改变上层纳米天线的某一维度的尺寸可以使沿这一维度的偏振光产生相位延迟, 从而可以实现一定的相位梯度. 这种结构对电磁波的偏振依赖性比较强, 因此可以通过具有两个自由度的十字架结构来改变超表面的偏振敏感性. 图 1 给出了我们所设计的光通信波段偏振不敏感反射式超表面结构单元的示意图, 结构单元常数为 Γ . 整个单元由三层材料组成, 分别为 Au-SiO₂-Au. 最上层为十字形金属结构, 其厚度为 t_1 , 宽度为 w , x 方向的长度为 l_x , y 方向的长度为 l_y ; 中间层为 SiO₂ 绝缘层, 其厚度为 t_2 ; 底层为金属背板, 其厚度为 t_3 .

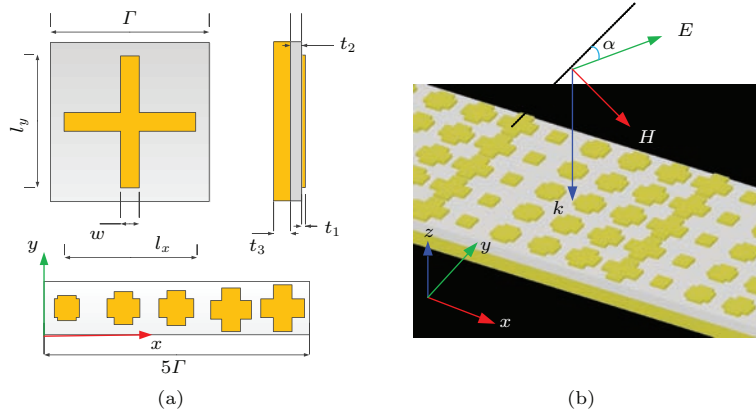


图 1 (网刊彩色) 超表面结构设计示意图 (a) 结构单元; (b) 超表面示意图
Fig. 1. (color online) Schematics of the designed metasurface: (a) unit cell; (b) metasurface.

为了在不同的偏振方向得到理想的相位梯度, 我们先固定绝缘层厚度 t_2 , 底层金属背板厚度 t_3 , 十字形金属结构宽度 w , 通过改变十字结构长度为 l_x, l_y 来实现在 x 方向理想的一维相位梯度. 使用 Lumerical FDTD Solutions 软件, 通过改变结构单元的尺寸对反射光波的相位进行扫描, 通过相位曲线我们初步选取了金属天线的尺寸. 我们设计了中心工作波长在 $\lambda = 1480 \text{ nm}$ 的偏振不敏感反射式超表面, 我们选取了 5 个金属十字天线, 通过对金属十字天线参数的进一步优化, 在 x 方向实现了 2π 相位的覆盖, 因此超表面的相位梯度为 $2\pi/5\Gamma$. 所设计的偏振不敏感反射式超表面的示意图如图 1(a) 所示, 超表面的基本结构-超晶胞 (super cell) 是由 5 个结构单元组成, 其尺寸为 $5\Gamma \times \Gamma$ (其中, $\Gamma = 400 \text{ nm}$), 这 5 个结构单元的几何参数如表 1 所示; 从表 1 中可以看出超表面的厚度仅为 $250 \text{ nm} (\sim \lambda/6)$, 是一种亚波长结构.

表 1 超晶胞结构单元的几何参数
Table 1. Geometry parameters of a super cell.

	单元 1	单元 2	单元 3	单元 4	单元 5
l_x/nm	152	242	267	297	352
l_y/nm	152	242	267	297	352
w/nm	150	150	150	150	150
t_1/nm	30	30	30	30	30
t_2/nm	90	90	90	90	90
t_3/nm	130	130	130	130	130

对于存在相位梯度的超表面, 光波的反射遵循广义反射定律^[1,5]

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda}{2\pi n_i} \frac{d\phi}{dx}, \quad (1)$$

其中, λ 为入射光波的波长, θ_r 为反射角度, θ_i 为入射角度, n_i 是入射/反射介质的折射率, ϕ 为 x 方向任意位置的相位, $d\phi/dx$ 即沿着 x 方向的相位梯度. 当光波从空气中正入射到超表面上时, 广义反射定

律可进一步简化为

$$\theta_r = \arcsin(\lambda/5\Gamma). \quad (2)$$

对于工作波长 1480 nm 单色光从空气中正入射到超表面时, 由 (2) 式理论计算可得到异常反射角度 $\theta_r = 47.7^\circ$.

3 结果与分析

因为任意一束偏振光可以看作是 x -偏振光和 y -偏振光的矢量合成, 因此我们分别选取了正入射的 x 方向和 y 方向的线偏振光作为光源 (如图 1 (b) 所示, 即 α 分别取 90° 和 0°), 对所设计的偏振不敏感反射式超表面的电磁波偏振响应特性进行了研究. 首先我们对边界条件进行了设置, 在 x, y 方向设置周期性边界条件, 在 z 方向设置完美匹配层. 图 2 展示了一个超晶胞结构内, 波长为 1480 nm 的 x -偏振光和 y -偏振光正入射到超表面上时, 散射光波在 $z = 6000$ nm 处的相位和振幅沿着 x 方向的分布曲线. 从图 2 (a) 相位分布曲线可以看出不同位置的天线对正入射偏振光有不同的相位响应, 但所产生的相位梯度大致相等, 并且满足方程 $\phi(x) \approx \phi_0 + \xi x$ (其中, ξ 为相位梯度). 从图 2 (a) 中我们还可以发现, 所设计的超表面对 x -偏振正入射光和 y -偏振正入射光基本上具有相同的相位响应特性, 并且相位响应线性度很好. 此外, 从图 2 (b) 中可以看出对 x -偏振光和 y -偏振光归一化振幅都在 0.8 的范围内波动, 并且两者有相同的分布情况. 因此, 可以看出我们所设计的结构具有偏振不敏感的特性.

图 3 给出了 x -偏振和 y -偏振正入射光照射下的 x - z 平面内的反射电场分布图, 当 x -偏振光正入射时, 其平行于入射平面的反射电场 E_p 可分解为电场 E_x 分量和 E_z 分量, 电场分布分别如图 3 (a), (b) 所示; 当 y -偏振正入射光照射时, 其反射电场 E_y 的分布如图 3 (c) 所示. 比较图 3 中的各个电场在 x - z 平面内的电场图, 我们发现电场 E_x 和 E_z 与 E_y 的波阵面大致相同, 并且其振幅在数值上满足 $|E_x| = |E_y| \cos(\theta_r)$, $|E_z| = |E_y| \sin(\theta_r)$ 关系. 由此可见, x -偏振光正入射时的反射电场 E_p 的振幅与 y -偏振光正入射时的反射电场 E_y 的振幅相等; 并且在后面的讨论中会发现两者的相位分布也相同. 因此, 我们所设计的超表面是偏振不敏感的.

图 3 中箭头方向为波矢 k 的方向, 可以看出对于两种不同偏振方向的正入射光其反射电场均具有较好的波阵面, 并且反射角度约为 47.6° , 与理论计算值相吻合. 出现这种情况的原因如下: 一方面是由于这种结构的超表面在 x -偏振方向和 y -偏振方向都具有良好的线性相位梯度, 如图 2 (a) 所示; 另一方面, 这是因为 $m = -1, 0$ 衍射级次的光都被完全抑制了, 即所有的入射偏振光都遵循广义反射定律, 转换为异常反射光.

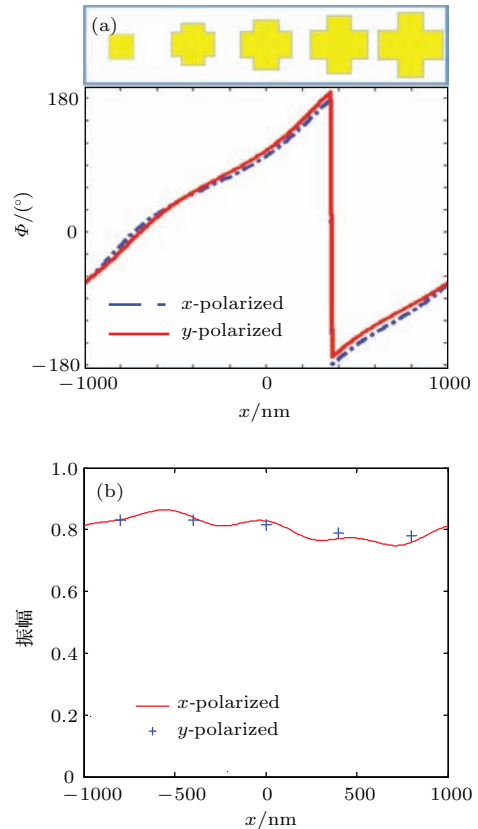


图 2 (网刊彩色) x -偏振与 y -偏振正入射光照射下散射光的相位响应与振幅分布 (a) 相位响应; (b) 振幅分布
Fig. 2. (color online) Phase responses and amplitude distributions under the illumination of normally x - and y -polarized incident light: (a) Phase responses; (b) amplitude distributions.

另一方面, 异常反射效率和远场光强分布是反射式超表面的重要性能指标 [1, 17-20], 并且远场光强分布决定了一些光器件性能的好坏, 因此我们对反射效率和远场光强分布进行了研究. 我们所设计的超表面的反射率为 70%, 其能量损失主要来自于金属天线的共振吸收、绝缘层介质的吸收、天线间的耦合损耗以及金属的欧姆损耗. 为了便于分析超表面的远场光强分布特性, 我们对远场光强采取了归一化, 其远场光强分布如图 4 (a) 所示, 对于 1480

nm 的正入射的线偏振光, 其异常反射角为 47.62° , 与前面理论计算值相符合. 从图 4(a) 中发现对于入射波长为 1480 nm 的 x -偏振与 y -偏振正入射光, 其衍射级次 $m = -1, 0$ 级基本完全被抑制. 通过计算各个级次的光强度在总光强中的比重, 我们发现反射光总能量的 99% 都被反射到衍射 +1 级次, 这表明我们提出的结构能够实现高效率的异常反射.

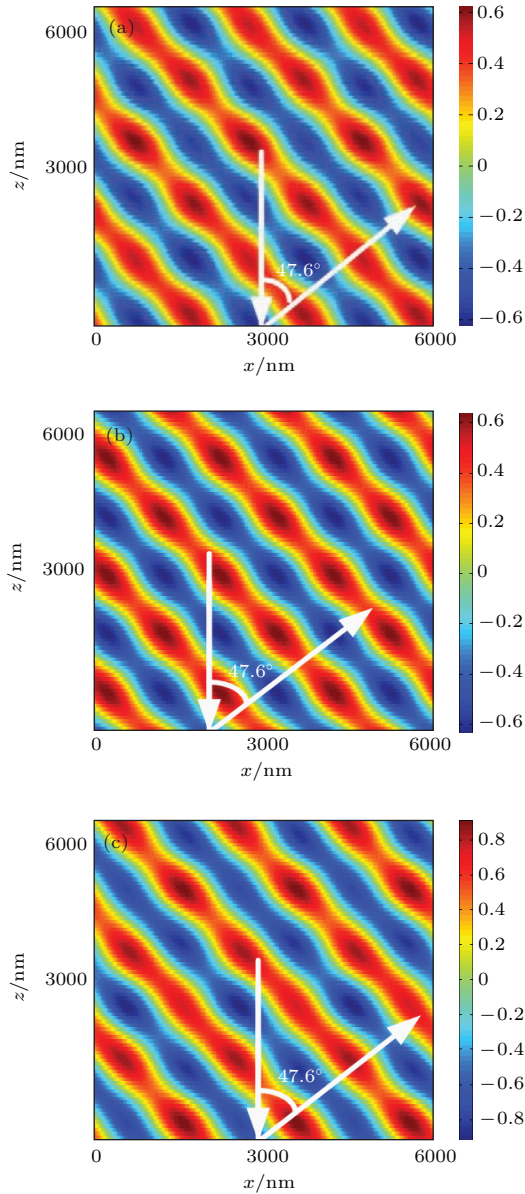


图 3 (网刊彩色) x - z 平面内 x -偏振与 y -偏振正入射光反射电场图 (a) x -偏振光正入射时反射电场分量 E_x 场图; (b) x -偏振光正入射时反射电场分量 E_z 场图; (c) y -偏振光正入射反射电场图

Fig. 3. (color online) Reflected electric-field pattern in the x - z plane for the electric-field component along the (a) x - and (b) y -direction illuminated by the x -polarized normally incident light; (c) Reflected electric-field pattern in the x - z plane for y -polarized normally incident light.

为了进一步说明所设计超表面在远场的偏振不敏感性, 我们对 x -偏振与 y -偏振正入射光的远场光强与相位分布同时进行了研究, 从图 4(a) 中可以看出 x -偏振与 y -偏振正入射光经过超表面反射后, 其反射光具有相同的光强度和相同的反射角度, 并且从图 4(b) 中可以看出两者在任意反射角度的相位也非常接近, 表明这种结构的超表面能够提供很好的偏振不敏感异常反射.

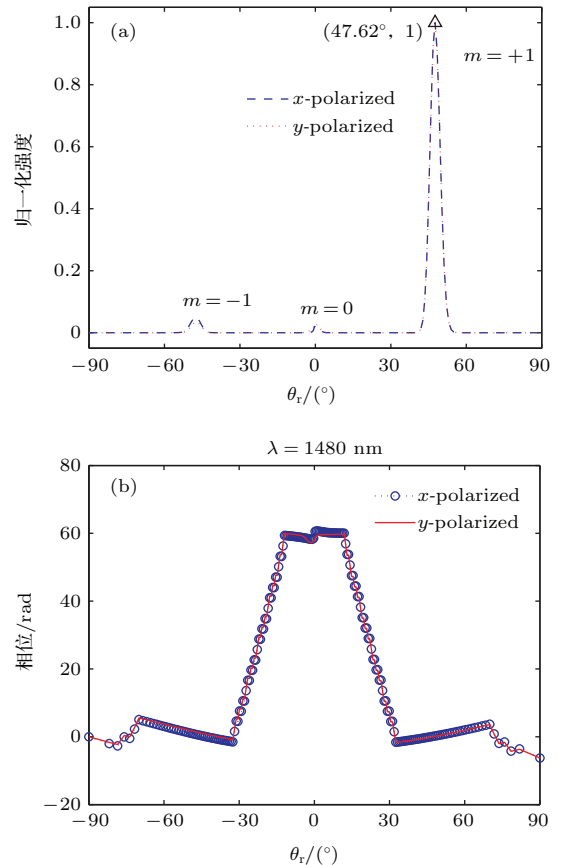


图 4 (网刊彩色) x -偏振 y -偏振正入射光的远场光强与相位分布 (a) 远场归一化光强分布; (b) 远场相位分布

Fig. 4. (color online) Normalized far-field intensity and phase distributions for x - and y -polarized normally incident light: (a) Normalized far-field intensity distributions; (b) far-field phase distributions.

以上都是基于正入射情况下的偏振不敏感特性; 然而, 在许多实际应用中需要所设计的器件能在不同入射角度的情况下亦具有偏振不敏感的性能. 为此, 我们研究了超表面偏振特性对入射角度的依赖性. 如图 5(a) 所示, 我们通过改变入射角度 θ_i 的值, 分别对 1480 nm 波长的 x -偏振和 y -偏振入射光源在超表面上的散射特性进行研究.

如图 5(b), 当入射光线在法线的左侧, 入射角

度定义为正值; 当反射光线在法线的右侧, 反射角度定义为正值. 通过FDTD仿真我们发现所设计的超表面在不同入射角度的 x -偏振和 y -偏振入射光的照射下, 其反射角度相等, 并分布在广义斯涅耳反射定律函数曲线上. 此外, 在第二象限(即 $\theta_i < 0, \theta_r > 0$), 反射光线与入射光线同位于法线的右侧, 具有明显的负反射现象.

图5(c)描述了散射光波的电场的归一化远场光强分布 $P(\theta_r, \lambda)/P_0$, 我们选取了1480 nm偏振

平面波正入射到相同尺寸的金平板上发生镜面反射时, 在远场的光强作为归一化光强的参考值 P_0 . 从图5(c)中, 可以看出对于不同的偏振入射光, 在 $\theta_i \in [-30^\circ, 0^\circ]$ 具有相同的光强分布, 光强峰值所在的位置遵循广义斯涅耳反射定律; 并且从图5(b)中可以发现两者的相对相位差为零. 在 $\theta_i \in (-40^\circ, 0^\circ)$ 的范围内, 远场光强接近70%. 因此, 我们设计的超表面具有高效宽入射角度偏振不敏感的特性.

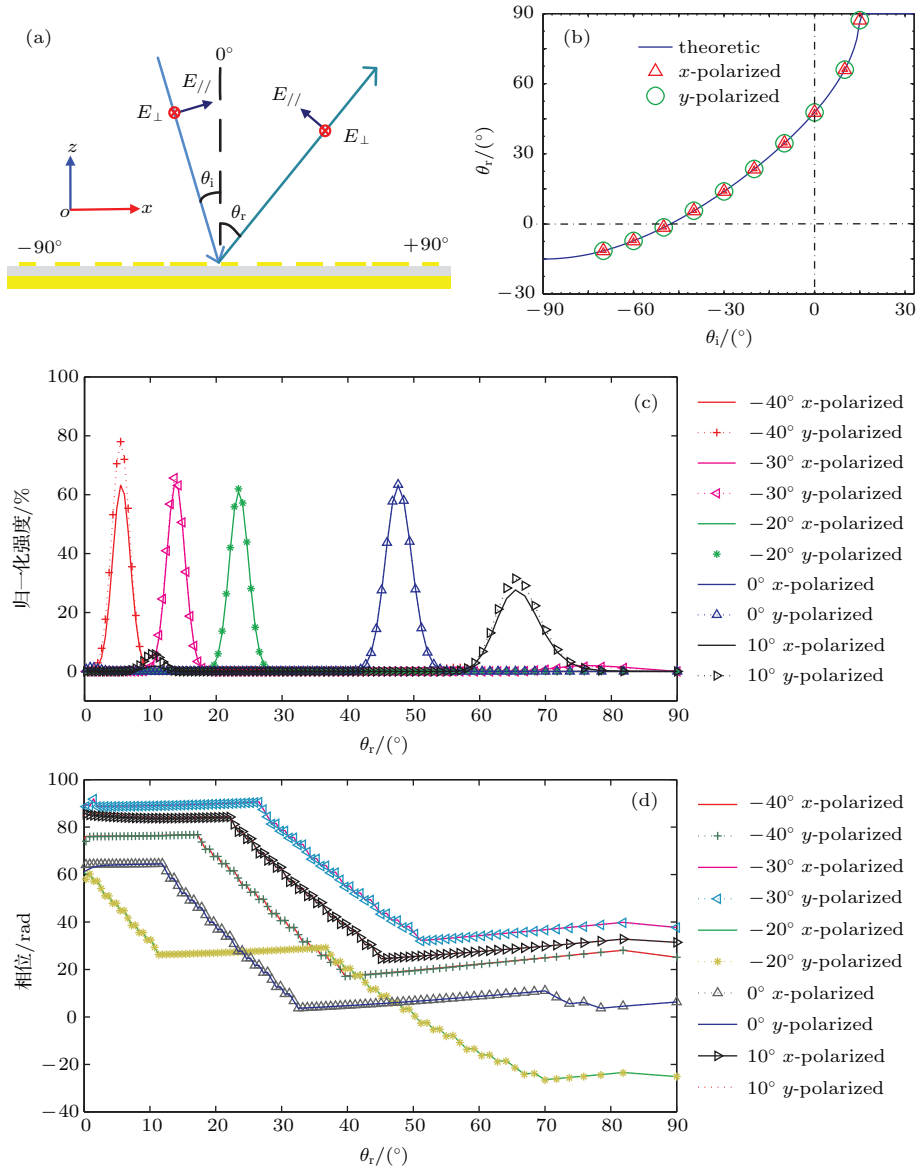


图5 (网刊彩色) 宽入射角度超表面的特性 (a) 偏振光波掠入射示意图; (b) x -偏振和 y -偏振掠入射光的异常反射角度分布的仿真结果; (c) x -偏振和 y -偏振掠入射光的异常反射归一化远场光强分布; (d) 远场相位分布

Fig. 5. (color online) Characteristics of the metasurface under the illumination of a broad incident angle at $\lambda = 1480$ nm: (a) Schematic diagram of the reflection at various angles of incidence; (b) simulation results of anomalous reflection under the illumination of x - and y -polarized light at different incident angles; (c) normalized far-field intensity $P(\theta_r, \lambda)/P_0$ and (d) phase distributions for the designed metasurface illuminated by an x - and y -polarized light at $\lambda = 1480$ nm with different incident angles.

4 结 论

本文提出了一种光通信波段的偏振不敏感的超表面结构,其厚度为250 nm(仅为 $\lambda/6$).它采用简单的金属十字结构作为基本结构单元,通过调整十字结构的几何尺寸,实现了散射光的相位在一个超晶胞内从 $0-2\pi$ 的线性变化,使其表现出异常反射特性,解决了传统异常反射式超表面对偏振依赖性的问题.这种结构的超表面可以将所有散射光的能量都集中在异常反射 $m = +1$ 级次,具有较高的异常反射转换效率,其反射率约70%;并且在入射角度 $\theta_i \in [-30^\circ, 0^\circ]$ 的范围内都具有偏振不敏感的特性.在光开关、空间光束调控以及波分复用器/解复用器等光器件中具有潜在的应用前景.此外,如果进一步结合电磁编码超材料或者可编程超材料的概念^[24],则不仅可以很方便地设计出本文中的偏振不灵敏超表面器件,还可以快捷地设计出其他功能的器件^[25],特别是性能可调控的超表面器件,这在光通信、信号处理、显示成像等领域具有重要的应用.

感谢扬州大学物理科学与技术学院韩玖荣教授的指导与讨论.

参考文献

- [1] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nature Mater.* **11** 426
- [3] Yu N, Capasso F 2014 *Nature Mater.* **13** 139
- [4] Sun Y Y, Han L, Shi X Y, Wang Z N, Liu D H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104201 (in Chinese) [孙彦彦, 韩璐, 史晓玉, 王兆娜, 刘大禾 2013 物理学报 **62** 104201]
- [5] Sun S L, He Q, Zhou L 2015 *Physics* **44** 366 (in Chinese) [孙树林, 何琼, 周磊 2015 物理 **44** 366]
- [6] Wu C J, Cheng Y Z, Wang W Y, He B, Gong R Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164102 (in Chinese) [吴晨骏, 程用志, 王文颖, 何博, 龚荣洲. 2015 物理学报 **64** 164102]
- [7] He J, Wang X, Hu D, Ye J, Feng S, Kan Q, Zhang Y 2013 *Opt. Express* **21** 20230
- [8] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702-6
- [9] Chen X, Huang L, Mühlenbernd H, Li G, Bai B, Tan Q, Jin G, Cheah K K, Qiu C, Li J, Zentgraf T, Zhang S 2012 *Nat. Commun.* **3** 1198
- [10] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, Zhang H, Chen S, Bai B, Tan Q, Jin G, Cheah K-K, Qiu C, Li J, Zentgraf T, Zhang S 2013 *Nat. Commun.* **4** 2808
- [11] Alaei R, Farhat M, Rockstuhl C, Lederer F 2012 *Opt. Express* **20** 28017
- [12] Chen H Y, Wang J Fu, Ma H, Qu S B, Zhang J Q, Xu Z, Zhang A X 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014201
- [13] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Zheng L, Zhou H, Xu Z, Zhang A X 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014202
- [14] Lee Y U, Kim J, Woo J H, Bang L H, Choi E Y, Kim E S, Wu J 2014 *Opt. Express* **22** 20816
- [15] Xie Z, Wang X, Ye J, Feng S, Sun W, Akalin T, Zhang Y 2013 *Sci. Rep.* **3** 3347
- [16] Bonod N, Popov E, Enoch S, Néauport 2006 *J. Eur. Opt. Soc-Rapid* **1** 06029
- [17] Li Z W, Huang L R, Lu K, Sun Y L, Min L 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 112001
- [18] Sun S, Yang K, Wang C, Juan T, Chen W, Liao C, He Q, Xiao S, Kung W, Guo G, Zhou L, Tsai D P 2012 *Nano Lett.* **12** 6223
- [19] Li Y, Liang B, Gu Z, Zou X, Cheng J 2013 *Sci. Rep.* **3** 2546
- [20] Zhang L, Hao J, Qiu M, Zouhdi S, Yang J K W, Qiu C W 2014 *Nanoscale* **6** 12303
- [21] Pors A, Albrechtsen O, Radko I P, Bozhevolnyi S I 2013 *Sci. Rep.* **3** 2155
- [22] Paul O, Imhof C, Lägler B, Wolff S, Heinrich J, Höfling S, Forchel A, Zengerle R, Beigang R, Rahm M 2009 *Opt. Express* **17** 819
- [23] Ma H F, Wang G Z, Kong G S, Cui T J 2015 *Sci. Rep.* **5** 9605
- [24] Cui T J, Qi M, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light: Science & Applications* **3**e218
- [25] Liu S, Chen H, Cui T J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 151601

Polarization-insensitive and broad-angle gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection*

Liu Tong-Jun^{1)2)†} Xi Xiang¹⁾ Ling Yong-Hong¹⁾ Sun Ya-Li¹⁾
Li Zhi-Wei¹⁾ Huang Li-Rong^{1)‡}

1) (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 14 July 2015; revised manuscript received 15 August 2015)

Abstract

Polarization-insensitive metasurfaces are of great value in practical applications. In this paper, we present a polarization-insensitive reflective phase-gradient metasurface operating in optical communication band which has almost the same electromagnetic (EM) responses for both x - and y -polarized incident waves with high-efficiency anomalous reflection.

The reflective metasurface employs a typical metal (Au)-insulator (SiO₂)-metal (Au) structure, in which the top metal layer consists of periodic arrays of isotropic cross-shaped gold antennas, i.e. unit cells. The supercell of the metasurface is composed of five unit cells with their dimensions different from each other. The normally incident waves are reflected by the metal-grounded plane, but the reflection phases of both x - and y -polarized waves are controlled by changing the dimensions of their unit cells. Based on the finite-difference time-domain simulations, we investigate the polarization-dependent EM responses of this metasurface under the illumination of linearly polarized incident plane waves. Selecting carefully five cross-shaped gold antennas in different dimensions, we obtain polarization-insensitive metasurface with high-performance anomalous reflection in optical communication band.

First, in order to investigate the polarization sensitivity of the proposed metasurface, we study the EM responses for x - and y - polarized incident waves, since arbitrary linearly-polarized EM waves can be separated into two orthogonally-polarized components. We find that the two orthogonally-polarized incident EM waves have almost the same phase and amplitude response with the phase nearly linearly changing from 0 to 2π within a supercell, hence a constant gradient of phase discontinuity is introduced and anomalous reflection will occur. We further analyze the reflected electric-field patterns and the far-field intensity distributions, from which we find that the reflected beams exhibit low-distortion wavefronts and the scattered light is predominantly reflected into the anomalous mode. As a consequence, high-efficiency anomalous reflection is realized, with a 70% reflectivity at the operating wavelength of 1480 nm. Furthermore, we look into the incident-angle dependence of the proposed metasurface, and find that the designed metasurface can exhibit polarization insensitivity within a broad incident angle ranging from -30° to 0° .

In conclusion, we propose a broad-angle polarization-insensitive reflective gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection, which has potential applications in optical communications, signal processing, displaying, imaging and other fields.

Keywords: gradient metasurface, polarization-insensitive, broad-angle, anomalous reflection

PACS: 78.67.Pt, 42.25.Bs, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.64.237802

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120142110064).

† Corresponding author. E-mail: tongjun_liu@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: lrhuang@mail.hust.edu.cn