

## 非晶硅纳米圆柱团超表面的双峰近完美吸收效应

邵莉<sup>1\*</sup>, 司江南<sup>2</sup>, 邓晓旭<sup>2</sup><sup>1</sup>中国航发西安航空发动机有限公司, 陕西 西安 710021;<sup>2</sup>上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

**摘要** 利用非晶硅纳米圆柱团超表面, 模拟实现了可见光波段的双峰近完美吸收效应。采用离散偶极子近似法, 研究了电偶极、磁偶极和电四极对纳米圆柱团超表面散射截面的贡献。模拟分析了非晶硅纳米圆柱团超表面的透射、反射和吸收光谱和电场分布, 调整电偶极、磁偶极和电四极米氏共振光谱使其重合并产生相干耦合作用, 进而产生电场局域增强效应, 实现可见光波段双峰近完美吸收效应, 且其对入射角不敏感。非晶硅纳米圆柱团超表面双峰近完美吸收效应具有低损耗、角度不敏感等特性, 有望被应用于光学隔离、能量采集等纳米光子学领域。

**关键词** 表面光学; 米氏共振; 近完美吸收; 超表面; 非晶硅

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2224001

## Dual-Peak Near-Perfect Absorption of Amorphous Silicon Nanocylinder Cluster Metasurface

Shao Li<sup>1\*</sup>, Si Jiangnan<sup>2</sup>, Deng Xiaoxu<sup>2</sup><sup>1</sup>AECC Xi'an Aero-Engine Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China;<sup>2</sup>School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** In this paper, an amorphous silicon (a-Si) nanocylinder cluster metasurface is used to realize dual-peak near-perfect absorption in the visible spectral range. The contributions of electric dipole (ED), magnetic dipole (MD), and electric quadrupole to the scattering cross section of the nanocylinder cluster metasurface are studied via discrete dipole approximation. The transmission, reflection, and absorption spectra and electric field distribution of the a-Si nanocylinder cluster metasurface are simulated and analyzed. The Mie resonance of ED, MD, and electric quadrupole is tuned for the overlap and coherent coupling of the spectra, which further results in the local enhancement of the electric field and the dual-peak near-perfect absorption in the visible spectral range that is insensitive to the incident angle. The dual-peak near-perfect absorption of the a-Si nanocylinder cluster metasurface with low loss and angle insensitivity is expected to be applied to nanophotonic fields such as optical separation and energy collection.

**Key words** optics at surfaces; Mie resonance; near-perfect absorption; metasurface; amorphous silicon

**OCIS codes** 240.6490; 300.1030; 160.3918; 290.4020

## 1 引言

硅基纳米结构超表面在电磁波作用下诱导产生米氏共振, 具有低损耗、电场和磁场的近场增强效应等特点, 其相关研究越来越受到科研工作者的重

视<sup>[1-2]</sup>。复杂纳米结构除了可产生电偶极共振、磁偶极共振, 还可以产生包括电四极共振、磁四极共振、电八极共振、磁八极共振在内的高阶多极矩共振, 它们共同对散射场产生贡献, 引起许多新现象<sup>[3-18]</sup>。

包括高阶极子在内的米氏共振之间的相互干涉

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61927822)

通信作者: \*2304694600@qq.com

被称为广义的 Kerker 效应,通过不同类型的电磁极子共振的相互作用,可实现不同形式的定向散射<sup>[19-23]</sup>。例如 Shamkhi 等<sup>[24]</sup>研究了立方体纳米结构的散射特性;立方体纳米结构在平面电磁波作用下,激发出电偶极子、磁偶极子、电四极子和磁四极子,多极子之间的相互作用,导致前向散射、背向散射被抑制,横向散射被增强,光场被束缚在立方体纳米结构的平面内。Li 等<sup>[25]</sup>提出的纳米 V 型晶体硅天线在入射光作用下激发出电偶极共振、磁偶极共振和电四极共振模式,它们之间的相干作用导致了出射光振幅和相位的改变,使不同波长的光波沿不同角度的方向出射,该过程不仅实现了定向散射,还对光的波长具有选择性。

本文提出了非晶硅纳米圆柱团超表面,模拟实现了波长 654 nm 和 667 nm 处的双峰近完美吸收效应。基于离散偶极子方法,通过计算分析得到非晶硅纳米圆柱团超表面的散射场仅由电偶极矩、磁偶极矩和电四极矩所贡献;进一步推导了超表面的透射系数和反射系数以及完美吸收条件。利用时域有限差分(FDTD)方法模拟了超表面的透射、反射和吸收光谱以及电场分布,并研究了入射光角度对吸收光谱的影响;电偶、磁偶和电四极米氏共振诱导

产生了电场局域增强效应,实现了入射角不敏感的双峰近完美吸收效应。非晶硅纳米圆柱团超表面的双峰近完美吸收效应具有角度不敏感和低损耗特性,在光学隔离、能量采集等纳米光子学领域中具有良好的应用前景。

## 2 基本原理

### 2.1 非晶硅纳米圆柱团超表面结构

非晶硅纳米圆柱团超表面的结构如图 1(a)所示,超表面周期性单元如图 1(b)所示,内部包含 4 个纳米非晶硅圆柱,其中两个大尺寸非晶硅纳米圆柱的半径为  $r_1 = 80$  nm,两个小尺寸非晶硅纳米圆柱的半径为  $r_2 = 63$  nm。超表面单元周期  $D_x = D_y = 400$  nm。坐标轴的原点位于正方形单元的中心位置, $x$ 、 $y$  坐标轴与正方形单元的边平行。大尺寸纳米圆柱的圆心与  $x$ 、 $y$  坐标轴的距离均为  $d_1 = 90$  nm;小尺寸纳米圆柱的圆心与  $x$ 、 $y$  坐标轴的距离均为  $d_2 = 80$  nm。非晶硅的厚度  $h = 140$  nm。非晶硅的折射率  $n_{\text{a-Si}}$  和消光系数  $k$  分别如图 1(b)中的实线和虚线所示。入射光为沿  $x$  方向偏振的平面波,垂直入射于非晶硅圆柱团超表面。

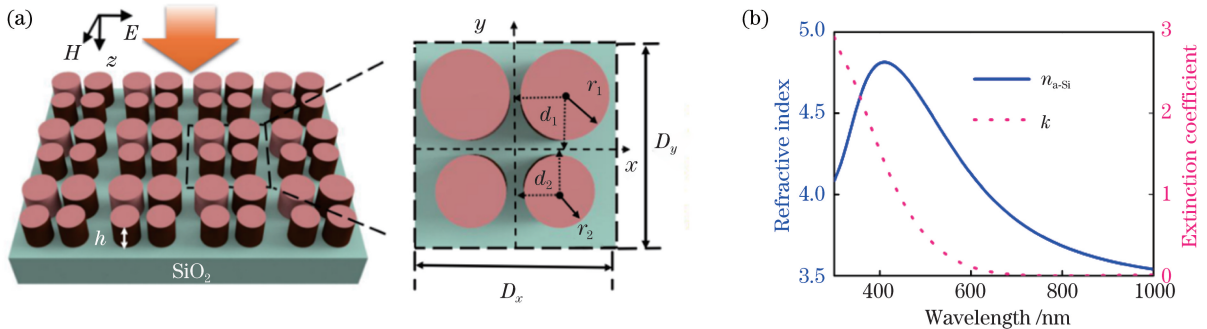


图 1 非晶硅纳米圆柱团超表面。(a)非晶硅纳米圆柱团超表面结构;(b)非晶硅的折射率及消光系数

Fig. 1 Amorphous silicon nano cylinder cluster metasurface. (a) Schematic of amorphous silicon nano cylinder cluster metasurface; (b) refractive index and extinction coefficient of amorphous silicon

### 2.2 基于米氏共振的非晶硅超表面散射场理论分析

外界入射场作用下产生的感应极化强度为  $\mathbf{P}$ 。超表面感应极化强度产生的总散射场<sup>[26]</sup>为

$$\mathbf{E}_{\text{sca}}(\mathbf{r}) = \frac{k_0^2}{\epsilon_0} \hat{G}(\mathbf{r}) \mathbf{P}, \quad (1)$$

式中: $k_0$  为波数; $\epsilon_0$  为真空介电常数; $\hat{G}(\mathbf{r})$  为格林函数。基于离散偶极子近似的方法,感应极化强度被分解为不同极矩的贡献,对应地,总散射场  $\mathbf{E}_{\text{sca}}(\mathbf{r})$  也是由各个极矩所贡献。当入射光为  $x$  偏振的平面电磁波,由于超表面的对称性,超表面的电

偶极矩  $\mathbf{p}$ 、磁偶极矩  $\mathbf{m}$ 、电四极矩  $\hat{\mathbf{Q}}$ 、磁四极矩  $\hat{\mathbf{M}}$ 、电八极矩  $\hat{\mathbf{O}}$ 、环形偶极矩  $\mathbf{T}$  仅含有分量  $p_x$ 、 $m_y$ 、 $Q_{xz}$ 、 $M_{yz}$ 、 $O_{xzz}$  和  $T_x$ 。立体角  $d\Omega = \sin\theta \cdot d\varphi \cdot d\theta$  的远场散射能量  $dP_{\text{sca}}$  与总散射场的关系为

$$dP_{\text{sca}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} |\mathbf{E}_{\text{sca}}(\mathbf{r})|^2 r^2 d\Omega, \quad (2)$$

式中: $\mu_0$  为真空磁导率。对各个极矩的远场散射能量  $dP_{\text{sca}}$  进行全角度积分,得到了归一化超表面的散射截面  $\sigma_{\text{sca}}$  与各个极矩的关系<sup>[27]</sup>:

$$\sigma_{\text{sca}} \approx \frac{k_0^4}{6\pi\epsilon_0^2 |E_0|^2} |p_x|^2 + \frac{k_0^6 \mu_0}{6\pi |E_0|^2} |m_y|^2 + \frac{k_0^6 \mu_0}{720\pi |E_0|^2} |Q_{xz}|^2 + \frac{k_0^6 \mu_0 \epsilon_0}{80\pi |E_0|^2} |M_{yz}|^2 + \frac{k_0^8}{1890\pi |E_0|^2} |O_{xxx}|^2 + \frac{k_0^4}{6\pi\epsilon_0^2 |E_0|^2 c^2} |ik_0 T_x|^2, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \hat{G}_{xx} \approx \frac{i}{2S_L k_0} e^{\mp ik_0 z} \\ g_z \approx \mp \frac{-1}{2S_L} e^{\mp ik_0 z} \\ \hat{G}_x^Q \approx \mp \frac{e^{\mp ik_0 z}}{12S_L} \end{cases}, \quad (5)$$

式中： $c$  为光速； $E_0$  为入射光的电场强度。

基于 FDTD 方法模拟了非晶硅纳米圆柱团超表面的位移电流，利用离散偶极子方法计算了非晶硅纳米圆柱团超表面的不同极矩。根据(3)式，计算得到的各个极矩对非晶硅纳米圆柱团超表面散射截面的贡献如图 2 所示。在 654 nm 和 667 nm 光谱位置，非晶硅纳米圆柱团超表面的电偶极共振、磁偶极共振和电四极共振光谱位置靠近并接近重叠，对超表面的散射截面产生贡献，磁四极矩、电八极矩、环形偶极矩对超表面散射截面的贡献很小，可以忽略不计。

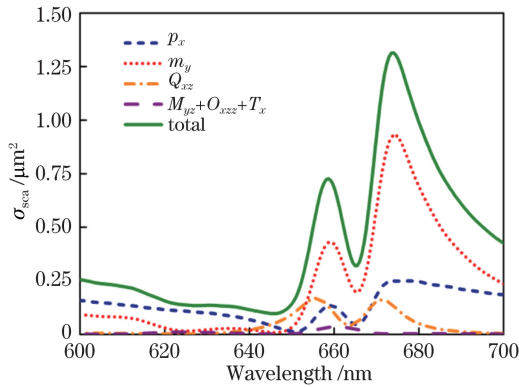


图 2 非晶硅纳米圆柱团超表面的散射截面

Fig. 2 Scattering cross section of amorphous silicon nano cylinder cluster metasurface

非晶硅圆柱团超表面的散射场主要由电偶极共振、磁偶极共振和电四极共振所引起。在  $x$  方向偏振光作用下，非晶硅圆柱团超表面中电偶极矩  $p_x$ 、磁偶极矩  $m_y$  和电四极矩  $Q_{xz}$  产生的散射场分别为

$$\begin{cases} E_x^p = \frac{k_0^2}{\epsilon_0} \hat{G}_{xx} p_x \\ E_x^m = -\frac{ik_0}{c\epsilon_0} g_z m_y, \\ E_x^Q = \frac{ik_0^3}{2\epsilon_0} \hat{G}_x^Q Q_{xz} \end{cases}, \quad (4)$$

式中： $k_0$  为波数； $p_x$  的格林函数  $\hat{G}_{xx}$ 、 $m_y$  的格林函数  $g_z$  和  $Q_{xz}$  的格林函数  $\hat{G}_x^Q$  分别可表示为

式中： $S_L$  为超表面一个周期的面积； $e$  指数与分式前的正负号分别对应着反射光的传播方向 ( $z < 0$ ) 和透射光的传播方向 ( $z > 0$ )。在远场近似下，非晶硅圆柱团超表面的透射系数和反射系数分别为

$$\begin{cases} t = 1 + \frac{ik_0}{2S_L} \left( \frac{p_x}{\epsilon_0 E_0} + \frac{m_y}{H_0} + \frac{k_0 Q_{xz}}{i6\epsilon_0 E_0} \right) \\ r = \frac{ik_0}{2S_L} \left( \frac{p_x}{\epsilon_0 E_0} - \frac{m_y}{H_0} - \frac{k_0 Q_{xz}}{i6\epsilon_0 E_0} \right) \end{cases}, \quad (6)$$

式中： $p_x / (\epsilon_0 E_0) = \alpha_{\text{eff}}^E$  定义为超表面的有效电偶极化率； $m_y / H_0 = \alpha_{\text{eff}}^M$  定义为超表面的有效磁偶极化率； $\alpha_{\text{eff}}^Q = k_0 Q_{xz} / (i6\epsilon_0 E_0)$  定义为超表面的有效电四极化率。超表面完美吸收条件为

$$\begin{cases} \text{Re}(\alpha_{\text{eff}}^E) = \text{Re}(\alpha_{\text{eff}}^M + \alpha_{\text{eff}}^Q) = 0 \\ \text{Im}(\alpha_{\text{eff}}^E) = \text{Im}(\alpha_{\text{eff}}^M + \alpha_{\text{eff}}^Q) = S_L / k_0 \end{cases}. \quad (7)$$

因而，超表面的反射系数  $r = 0$  和透射系数  $t = 0$ ，吸收率  $A = 1 - r^2 - t^2 = 1$ 。

### 3 分析与讨论

利用 FDTD 方法模拟了超表面非晶硅纳米圆柱团的位移电流，并基于离散偶极近似方法 (DDA) 利用位移电流计算了非晶硅圆柱团超表面的有效极化率。FDTD 是基于时域电磁场微分方程的数值计算方法；离散偶极子近似方法将不规则纳米结构分解为多个点偶极子，将每个点偶极子均视为点源，并分别计算其对散射场的贡献。非晶硅纳米圆柱团超表面周期为  $D_x = D_y = 400$  nm 时，超表面的模拟有效电偶极化率  $\alpha_{\text{eff}}^E$ 、有效磁偶极化率与有效电四极化率之和  $\alpha_{\text{eff}}^M + \alpha_{\text{eff}}^Q$  如图 3 所示。有效电偶极化率的虚部具有两个峰值，如图 3(a) 中的短虚线所示；在对应的波长位置，有效电偶极化率实部为零，如图 3(b) 中的实线+方形点所示。有效磁偶极化率与有效电四极化率之和的虚部同样存在共振峰，如图 3(a) 中的虚线所示，在对应的波长位置处，电四极和磁偶极化率实部趋向于零，如图 3(b) 中的实线所示。在波长 654~667 nm 处，有效磁偶极化率、有效电四极化率之和的虚部，与有效电偶极化率的虚部峰值重叠，基本满足近完美吸收条件。非晶硅纳米圆柱团超表面中同时存在电偶、磁偶和电四极



米氏共振。米氏共振的振动频率和纳米非晶硅圆柱的几何尺寸相关,调整非晶硅纳米圆柱的几何尺寸和周期,使电偶、磁偶和电四极米氏共振的光谱位置重合,产生共振吸收效应。将不同尺寸的纳米柱相结合产生多波长的共振吸收效应。

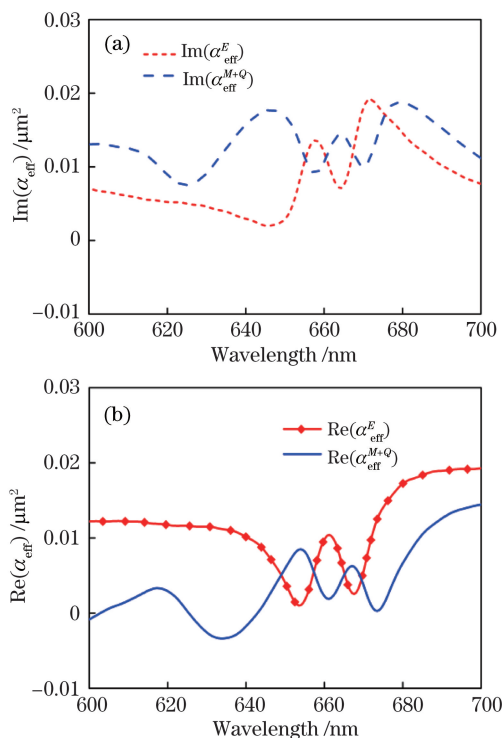


图 3 非晶硅纳米圆柱团超表面的有效极化率,其中周期  $D_x = D_y = 400 \text{ nm}$ 。(a)有效极化率的虚部; (b)有效极化率的实部

Fig. 3 Effective polarizabilities of amorphous silicon nano cylinder cluster metasurface, where periods are  $D_x = D_y = 400 \text{ nm}$ . (a) Imaginary parts of effective polarizabilities; (b) real parts of effective polarizabilities

利用 FDTD 软件模拟了非晶硅纳米圆柱团超表面的透射、反射与吸收光谱。非晶硅纳米圆柱团超表面的透射、反射和吸收光谱分别如图 4 中的虚线、点线与实线所示。由于超表面电偶极共振、磁偶极共振和电四极共振的相干作用,在 654 nm 和 667 nm 波长位置处,超表面的透射光谱处于较低值,反射光谱出现了明显下降,吸收光谱在 654 nm 波长处达到最高值 92%,在 667 nm 波长处达到了最高值 98%,实现了双峰近完美吸收效应。米氏共振的共振峰与非晶硅纳米圆柱的几何尺寸相关,同时通过改变超表面结构的周期也可以调整共振峰的位置,进而调整共振吸收峰的波长。

利用 FDTD 软件模拟了在 654 nm 与 667 nm

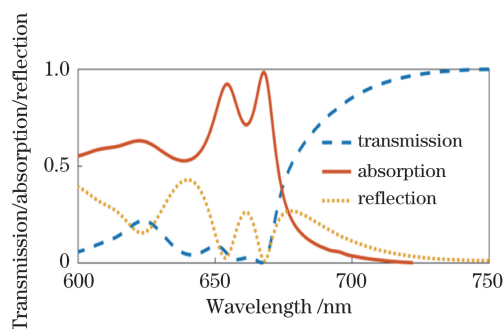


图 4 非晶硅纳米圆柱团超表面的模拟光谱

Fig. 4 Simulation spectra of amorphous silicon nano cylinder cluster metasurface

波长处非晶硅纳米圆柱团超表面  $x-y$  平面上的电场分布,分别如图 5(a)、(b)所示。在 654 nm 波长处,电场在左侧大尺寸纳米圆柱的左上方和右侧大尺寸纳米圆柱右上方被增强,同时两个小尺寸纳米圆柱之间的电场有一定的增强效应;在 667 nm 波长处,电场在左侧大尺寸纳米圆柱的左下方和右侧大尺寸纳米圆柱的右下方被增强,同时在小尺寸纳米圆柱之间,电场被增强。由于非晶硅纳米圆柱结

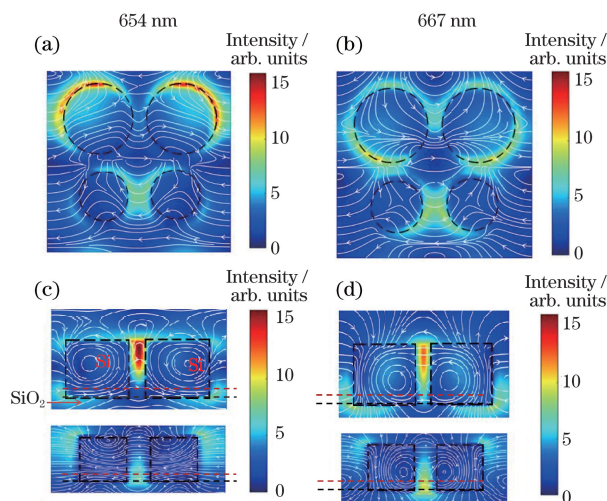


图 5 共振波长位置超表面  $x-y$  平面和  $x-z$  平面的电场与位移电流分布,其中图 5(a)、(b)是分别在图 5(c)、(d)中虚线位置截取的。(a)波长为 654 nm,  $x-y$  平面;(b)波长为 667 nm,  $x-y$  平面;(c)波长为 654 nm,  $x-z$  平面;(d)波长为 667 nm,  $x-z$  平面

Fig. 5 Simulated displacement currents and electric field distributions in  $x-y$  plane and  $x-z$  plane at resonant wavelengths of amorphous silicon nano cylinder cluster metasurface [Figs. 5(a) and 5(b) are respectively captured at the dotted line positions in Figs. 5(c) and 5(d)]. (a) In  $x-y$  plane at 654 nm; (b) in  $x-y$  plane at 667 nm; (c) in  $x-z$  plane at 654 nm; (d) in  $x-z$  plane at 667 nm

构中存在电偶、磁偶和电四极米氏共振,它们相互耦合导致电场局域增强效应,产生了超表面的双峰近完美吸收效应。利用 FDTD 软件模拟了 654 nm 与 667 nm 共振波长处大尺寸和小尺寸圆柱  $x$ - $z$  平面的电场分布和位移电流,结果如图 5(c)和(d)所示,位移电流在大尺寸纳米圆柱内呈现出多环形,为电偶极、磁偶极和电四极共振共同激发;小尺寸纳米圆柱内在 654 nm 波长处位移电流呈现出横向流动,仅电偶极共振被激发,在 667 nm 波长处,位移电流呈现多环形,电偶极、磁偶极和电四极共振被激发。在 654 nm 与 667 nm 波长处,由于电偶、磁偶和电四极米氏共振相干耦合,透射和反射被抑制,因此超表面的吸收被增强,同时电场被局域在非晶硅纳米

圆柱团超表面中。

利用 FDTD 软件模拟了非晶硅纳米圆柱团超表面在不同入射角下的光谱。非晶硅纳米圆柱团超表面沿  $x$  轴方向周期  $D_x=400$  nm,沿  $y$  轴方向周期  $D_y=400$  nm。入射角从  $0^\circ$ 到  $50^\circ$ 不断改变时,模拟的非晶硅纳米圆柱团超表面反射光谱、透射光谱和吸收光谱分别如图 6(a)~(c)所示。当入射角从  $0^\circ$ 增加到  $50^\circ$ 时,透射光谱和反射光谱两个抑制带的带宽略微展宽,导致吸收光谱的双吸收峰被展宽,吸收率高于 90%的光谱宽度分别从 4.0 nm、3.0 nm 展宽至 7.0 nm、3.6 nm。非晶硅纳米圆柱团超表面双峰完美吸收效应对入射角度不敏感。

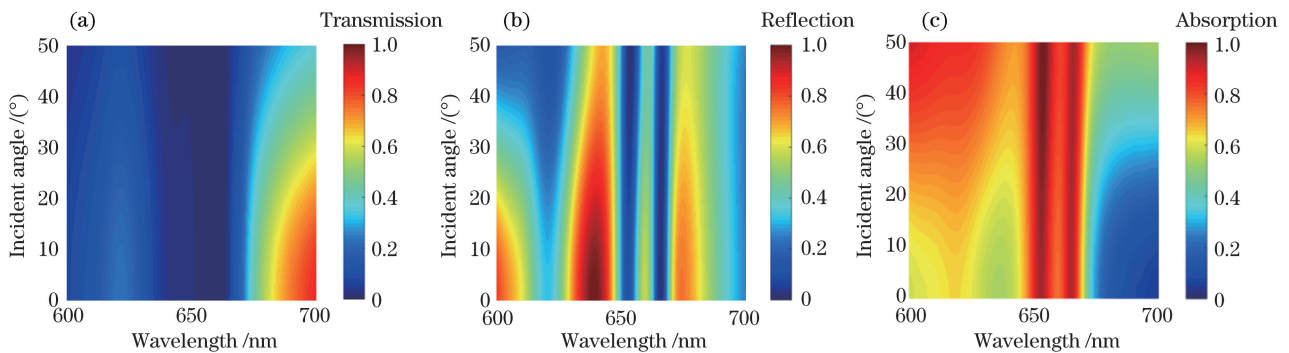


图 6 非晶硅纳米圆柱团超表面光谱随入射角的变化,其中  $D_x=400$  nm,  $D_y=400$  nm,  $r_1=80$  nm,  $r_2=63$  nm,  $d_1=90$  nm,  $d_2=80$  nm。(a)透射光谱;(b)反射光谱;(c)吸收光谱

Fig. 6 Optical spectra of amorphous silicon nano cylinder cluster metasurface with varied incident angle, where  $D_x=400$  nm,  $D_y=400$  nm,  $r_1=80$  nm,  $r_2=63$  nm,  $d_1=90$  nm, and  $d_2=80$  nm. (a) Transmission spectrum; (b) reflection spectrum; (c) absorption spectrum

## 4 结 论

提出非晶硅纳米圆柱团超表面,模拟实现了双峰近完美吸收效应。采用离散偶极子近似法,计算分析了各个极矩对于非晶硅纳米圆柱团超表面散射截面的影响;非晶硅超表面中,电偶极、磁偶极和电四极共振光谱位置重合,对散射截面产生贡献。利用 FDTD 方法,模拟研究了非晶硅纳米圆柱团超表面的电场分布以及透射、反射和吸收光谱。在多极矩共振重合的光谱位置,纳米圆柱间产生电场局域增强效应,在可见光波段实现了对入射角不敏感的双峰近完美吸收效应。非晶硅纳米圆柱团超表面因其对角度不敏感、低损耗以及高吸收性能在光学隔离、能量采集等纳米光子学领域中具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

[1] Babicheva V E, Petrov M I, Baryshnikova K V,

et al. Reflection compensation mediated by electric and magnetic resonances of all-dielectric metasurfaces [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(7): D18-D28.

[2] Hopkins B, Miroshnichenko A E, Kivshar Y S. All-dielectric nanophotonic structures: exploring the magnetic component of light[M]//Agrawal A, Benson T, de la Rua R M, et al. Recent trends in computational photonics. Springer series in optical sciences. Cham: Springer, 2017, 204: 285-313.

[3] Sayanskiy A, Danaeifar M, Kapitanova P, et al. All-dielectric metalattice with enhanced toroidal dipole response[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(19): 1800302.

[4] Alaei R, Rockstuhl C, Fernandez-Corbaton I. Exact multipolar decompositions with applications in nanophotonics [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(1): 1800783.

[5] Liu G D, Zhai X, Xia S X, et al. Toroidal resonance based optical modulator employing hybrid graphene-

- dielectric metasurface[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 26045-26054.
- [6] Basharin A A, Chuguevsky V, Volsky N, et al. Extremely high  $Q$ -factor metamaterials due to anapole excitation[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(3): 035104.
- [7] Miroshnichenko A E, Evlyukhin A B, Yu Y F, et al. Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8069.
- [8] Kruk S, Kivshar Y. Functional meta-optics and nanophotonics governed by Mie resonances[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2638-2649.
- [9] Tian J Y, Luo H, Yang Y Q, et al. Active control of anapole states by structuring the phase-change alloy  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 396.
- [10] Zurita-Sánchez J R. Anapole arising from a Mie scatterer with dipole excitation[J]. *Physical Review Research*, 2019, 1(3): 033064.
- [11] Gongora J S T, Miroshnichenko A E, Kivshar Y S, et al. Anapole nanolasers for mode-locking and ultrafast pulse generation[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15535.
- [12] Yang Z J, Jiang R B, Zhuo X L, et al. Dielectric nanoresonators for light manipulation [J]. *Physics Reports*, 2017, 701: 1-50.
- [13] Meng Q L, Zhang Y, Zhang B, et al. Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101603.  
孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101603.
- [14] Cui Z J, Wang Y, Zhu D Y, et al. Perfect absorption conditions and absorption characteristics of terahertz metamaterial absorber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614023.  
崔子健, 王玥, 朱冬颖, 等. 太赫兹超材料吸收器的完美吸收条件与吸收特性 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614023.
- [15] Fan L S, Zhang S W, Zhang Q L, et al. Research progress on fabrication of one-dimensional well-ordered oxide nanostructures by pulsed laser deposition [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190001.  
范丽莎, 张硕文, 张群莉, 等. 脉冲激光沉积制备一维有序氧化物纳米结构的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190001.
- [16] Ma J, Liu D D, Wang J C, et al. Plasmonic sensor with variable claddings based on metallic slit arrays [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(3): 032301.
- [17] Wang J, Wang X, Shao H, et al. Peak modulation in multicavity-coupled graphene-based waveguide system [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 9.
- [18] Wang J C, Yang L, Wang M, et al. Perfect absorption and strong magnetic polaritons coupling of graphene-based silicon carbide grating cavity structures [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(1): 015101.
- [19] Wei L, Bhattacharya N, Urbach H P. Adding a spin to Kerker's condition: angular tuning of directional scattering with designed excitation [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1776-1779.
- [20] Alaei R, Filter R, Lehr D, et al. A generalized Kerker condition for highly directive nanoantennas [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2645-2648.
- [21] Liu W, Kivshar Y S. Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13085-13105.
- [22] Staude I, Miroshnichenko A E, Decker M, et al. Tailoring directional scattering through magnetic and electric resonances in subwavelength silicon nanodisks [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(9): 7824-7832.
- [23] Zhang X M, Zhang Q, Zeng S J, et al. Dual-band unidirectional forward scattering with all-dielectric hollow nanodisk in the visible [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1275-1278.
- [24] Shamkhi H K, Baryshnikova K V, Sayanskiy A, et al. Transverse scattering and generalized Kerker effects in all-dielectric Mie-resonant metaoptics [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(19): 193905.
- [25] Li J Q, Verellen N, Vercruyse D, et al. All-dielectric antenna wavelength router with bidirectional scattering of visible light [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4396-4403.
- [26] Evlyukhin A B, Reinhardt C, Chichkov B N. Multipole light scattering by nonspherical nanoparticles in the discrete dipole approximation [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(23): 235429.
- [27] Wu J P, Zhang F W, Li Q, et al. Strong field enhancement in individual  $\Phi$ -shaped dielectric nanostructures based on anapole mode resonances [J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 570-579.