

# 全电介质纳米颗粒的制造及其应用

马浩<sup>1,2,3</sup>, 赵元安<sup>1,2,3,4\*</sup>, 邵建达<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

<sup>3</sup>中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800

<sup>4</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033

**摘要** 论述了全电介质纳米颗粒的光学性质, 介绍了全电介质纳米颗粒的制备方法, 分析了各种制备方法的优缺点, 回顾了全电介质纳米颗粒在高折射率纳米谐振器、光学纳米天线、超材料和超表面、非线性纳米光子学等方面的应用, 给出了全电介质纳米颗粒的研究重点及发展方向。

**关键词** 材料; 全电介质纳米颗粒; 电磁响应; 介电常数; 磁导率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.090004

## Fabrication and Application of All-Dielectric Nanoparticles

Ma Hao<sup>1,2,3</sup>, Zhao Yuanan<sup>1,2,3,4\*</sup>, Shao Jianda<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

**Abstract** In this paper, we discuss the optical properties of all-dielectric nanoparticles in detail, introduce the preparation methods of all-dielectric nanoparticles, and analyze the advantages and disadvantages of various preparation methods. Further, we review the applications of all-dielectric nanoparticles in the fields such as high-index nanometer resonators, nano-antennas, metamaterials and metasurfaces, and nonlinear nanophotonics. Finally, the research focus and development direction of all-dielectric nanoparticles are proposed.

**Key words** materials; all-dielectric nanoparticles; electromagnetic response; permittivity; permeability

**OCIS codes** 160.4236; 220.4241; 250.4390

## 1 引言

光与物质相互作用的研究是一个经典而永恒的课题, 其中精确操控光波一直是材料和电子工程科学家追求的目标<sup>[1]</sup>。有效的光操控意味着同时控制其电场分量和磁场分量。天然体材料在光学频率下的磁响应通常较弱, 往往会使光子器件只与光波的电场分量相互作用<sup>[2-3]</sup>。然而, 高频情况下纳米颗粒可以

实现人造磁, 这就为同时控制光波的电场和磁场分量提供了新思路。近年来, 研究者利用由贵金属(Au、Ag等)制成的纳米颗粒的局部表面等离子共振(LSPRs)效应增强光波的电磁场, 不仅实现了包括负磁导率<sup>[4]</sup>、负折射率<sup>[5]</sup>、零折射率<sup>[6]</sup>、光学手性<sup>[7-8]</sup>等一系列奇异的电磁响应, 而且显著提高了如二次谐波产生(SHG)<sup>[9]</sup>、三阶非线性吸收效应<sup>[10]</sup>、表面增强拉曼散射(SERS)<sup>[11-12]</sup>、太阳能电池陷光效率<sup>[13]</sup>等光学

收稿日期: 2018-10-22; 修回日期: 2018-11-21; 录用日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(11874369)

\* E-mail: yazhao@siom.ac.cn

过程的效率。然而,在实际应用中金属等离激元的热损耗限制了这类纳米材料的进一步发展<sup>[14]</sup>。一种替代的方法是使用由高折射率电介质材料(Si、Ge等)制成的纳米颗粒实现了具有低损耗的强磁场响应<sup>[15]</sup>。根据 Mie 理论,电介质纳米颗粒在光学频率下可表现出强磁共振行为<sup>[16]</sup>。这种激发模式的基本物理过程与金属纳米颗粒类似,只是金属中的电导电流取代了电介质纳米颗粒中的位移电流,其优势是电介质纳米颗粒的损耗很低。高折射率全电介质元件可以通过对光的振幅、相位、偏振的控制,实现对光场分布的调控。在 20 世纪前,Mie 理论可用来描述高折射率电介质纳米颗粒的共振行为已被证明<sup>[17]</sup>,近期越来越多的研究人员对全电介质纳米颗粒光学性质的研究产生浓厚的兴趣。高折射率电介质纳米颗粒的共振行为不仅可以实现具有丰富光学功能的低损耗非等离子体超材料和超表面<sup>[18-21]</sup>,而且为增强光与物质相互作用<sup>[22-25]</sup>以及非线性光操控<sup>[26-29]</sup>铺平了道路。

本文以全电介质纳米颗粒为主线,分析了高折射率电介质纳米颗粒的光学性质,介绍了纳米颗粒的制备方法,回顾了其在高折射率纳米谐振器、光学纳米天线、超材料和超表面、非线性纳米光子学中的应用。并在此基础上总结出全电介质纳米颗粒作为新型纳米光子器件的发展趋势,为纳米光子器件的设计及应用提供启发和帮助。

## 2 全电介质纳米颗粒的光学性质

### 2.1 球形纳米颗粒的散射理论

最简单的纳米颗粒是球形,Mie 散射理论可以精确地描述其电磁响应<sup>[17]</sup>。在该理论框架中,球形纳米颗粒散射的电磁场可表示为横电波(TE)和横磁波(TM)的球谐函数之和。这些谐波的振幅大小由电场模式的 Mie 散射系数  $a_n$  和磁场模式的 Mie 散射系数  $b_n$  表示。每个谐波都有其共振频率,使相应谐波的电磁场在球形颗粒的内部和外部均得到增强。利用纳米颗粒的共振行为增强光学响应可以描述各种各样的品质因子。如在光谱应用中,局部电场增强是定义如自发发射、拉曼散射、高次谐波产生等<sup>[30-32]</sup>过程效率的关键参数。根据时间耦合模理论,局部电场增强(模式体积上的平均值)可表示为<sup>[33]</sup>

$$\left(\frac{E_{\text{loc}}}{E_{\text{inc}}}\right) \propto r_{\text{rad}} \frac{Q^2}{V}, \quad (1)$$

式中: $Q = \omega / (r_{\text{rad}} + r_{\text{nr}})$ 为激发模式的品质因子; $E_{\text{loc}}$ 为局部电场强度; $E_{\text{inc}}$ 为入射电场强度; $r_{\text{rad}}$ 为纳米颗粒的辐射衰减速率; $r_{\text{nr}}$ 为纳米颗粒的非辐射

衰减速率; $V$ 为模式体积。(1)式表明较高的  $Q$  和较低的  $V$  有益于纳米颗粒的局部场增强。

与等离子体热损耗通道不同的是,高折射率 Mie 共振器的品质因子  $Q$  主要由辐射阻尼决定。当采用全电介质纳米颗粒操纵光波传播时,不应该视辐射为损耗。为描述纳米颗粒的辐射效率,定义一个相关的品质因子,即

$$\eta_{\text{rad}} = \frac{\sigma_{\text{scat}}}{\sigma_{\text{scat}} + \sigma_{\text{abs}}}, \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{scat}}$ 和 $\sigma_{\text{abs}}$ 分别为散射和吸收截面。当 $\eta_{\text{rad}}$ 接近 1 时,表明几乎可以利用所有的入射光使损耗极低。与此同时,尺寸更小的纳米颗粒更值得期待,因为它允许减小相邻纳米颗粒之间的距离,以降低空间色散效应的影响。

### 2.2 全电介质纳米颗粒的电磁共振

等离子体纳米颗粒的电场增强来源于自由电子振荡,当入射光的频率与球形纳米颗粒内自由电子振荡的频率相匹配时,等离子体振荡产生并使其周围电场极大增强。然而,这些振荡伴随着由带内和带间跃迁引起的热损耗并且最终加热纳米颗粒<sup>[34]</sup>。与等离子体纳米颗粒不同的是,当全电介质纳米颗粒中的有效光波长与纳米颗粒直径  $D$  相当时,颗粒中束缚电子振荡产生位移电流,从而使纳米颗粒的相对侧具有反向平行的电场极化,而磁场  $B$  在中间上下振荡,如图 1 所示<sup>[35]</sup>。这些位移电流没有欧姆阻尼,减少了光学纳米谐振器的非辐射损耗。

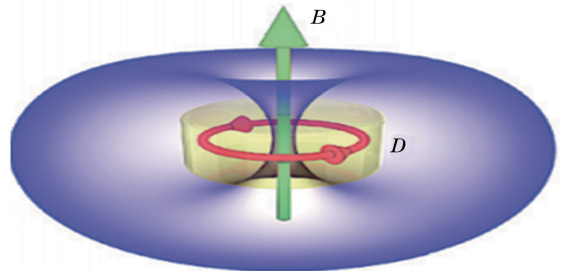


图 1 全电介质纳米颗粒中激发的磁偶极矩示意图<sup>[35]</sup>  
Fig. 1 Schematic of magnetic-dipole moment excited in all-dielectric nanoparticles<sup>[35]</sup>

在电介质和半导体中,远离其主要吸收波长时,位移电流远远超过了电导电流。图 2(a)给出室温下测量的晶体硅折射率实部和虚部的光谱依赖性<sup>[36]</sup>,而图 2(b)显示了晶体硅中电导电流与位移电流比值随光波长变化的关系<sup>[36]</sup>。可以看出,当波长大于 400 nm 时,晶体硅中的位移电流远远超过电导电流。因此,从电磁学的角度看,可见光谱范围内纯晶体硅可认为是电介质。

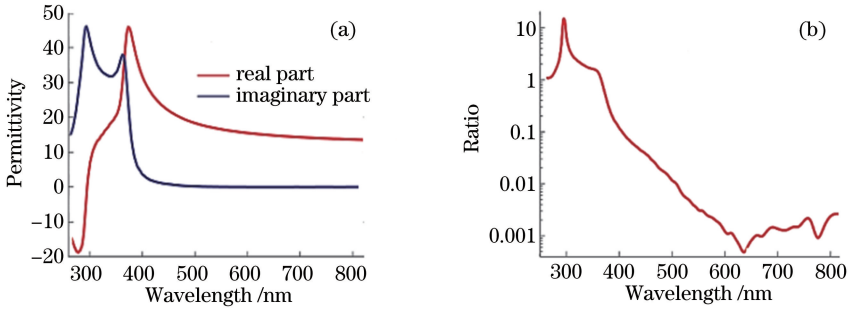


图2 室温下晶体硅的光谱依赖特性<sup>[36]</sup>。(a)折射率实部和虚部;(b)电导电流和位移电流的比率

Fig. 2 Spectral dependence properties of crystalline silicon at room temperature<sup>[36]</sup>. (a) Real and imaginary parts of refractive index; (b) ratio between electrical conduction current and displacement current

电介质纳米颗粒可认为是支持一系列电磁共振本征模的开放谐振器。球形纳米颗粒对平面波的衍射(Mie 散射)表明纳米颗粒支持不同阶次的电磁本征模式<sup>[37]</sup>。入射光波和本征模之间的耦合强度取决于电介质纳米颗粒的尺寸参数  $x = k_0 nR$ , 其中  $n$  为纳米颗粒的折射率,  $k_0$  为入射波在自由空间内的波数,  $R$  为纳米颗粒的半径。如果  $x \ll 1$ , 其衍射性

质可以用瑞利近似描述。随着  $x$  的增加 ( $1 < x < 4$ ), 基本磁偶极子(MD)共振会出现在颗粒电磁响应中。磁偶极子共振处的颗粒散射场与磁偶极子的辐射场相对应。随着  $x$  的进一步增加, 第一阶电偶极子(ED)共振形成。对于更大尺寸的纳米颗粒, 更高阶(四偶极、八偶极等)多极模式被激发。磁偶极子和电偶极子共振处的电场分布如图3所示<sup>[37]</sup>。

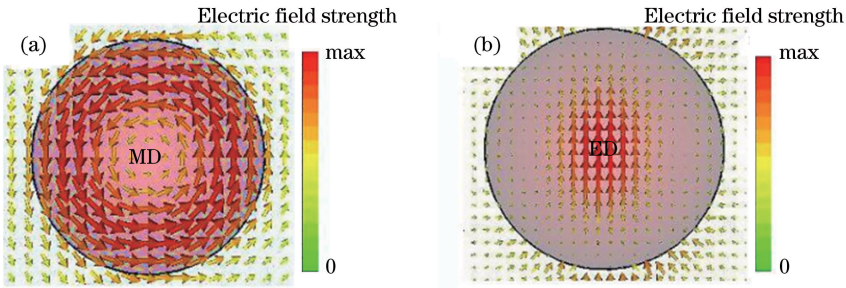


图3 不同条件下的纳米颗粒内的电场分布<sup>[37]</sup>。(a) MD共振;(b) ED共振

Fig. 3 Electric field distributions in nanoparticles under different conditions. (a) MD resonance; (b) ED resonance

偶极近似中球形纳米颗粒的 Mie 共振频率表示为

$$\operatorname{Re}(\alpha_e^{-1}) = \operatorname{Re} \left[ \left( i \frac{3\epsilon_h}{2k_h^3} a_1 \right) - 1 \right] = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{Re}(\alpha_m^{-1}) = \operatorname{Re} \left[ \left( i \frac{3}{2k_h^3} b_1 \right) - 1 \right] = 0, \quad (4)$$

式中:  $\alpha_e$  和  $\alpha_m$  分别为电极化率和磁极化率;  $\epsilon_h$  为纳米颗粒的介电常数;  $k_h = \sqrt{\epsilon_h} \omega / c$  为光波在纳米颗粒中的波数,  $\omega$  为光波的频率;  $c$  为真空中的光速;  $a_1$  和  $b_1$  为 Mie 散射系数<sup>[17]</sup>。纳米颗粒的电极化率和磁极化率与颗粒尺寸密切相关, 可以通过改变其尺寸来改变共振频率。

全电介质纳米颗粒在光学频率范围几乎没有电导电流, 其热损耗可以忽略不计。因此, 通过利用具有磁响应的全电介质纳米颗粒, 可以设计出具有独

特功能的低损耗纳米结构、复合材料和超曲面等。

### 3 全电介质纳米颗粒的制备方法

自1981年科学家发明研究纳米材料的工具——扫描隧道显微镜以来, 半导体纳米加工技术得到了空前的发展。硅作为最常见的半导体材料, 其折射率虚部相对较低且成本低廉, 因此成为可见光与近红外波段最常用的高折射率电介质纳米颗粒。过去几年中, 具有 Mie 共振响应的 Si 纳米颗粒制备技术一直在不断发展, 形成了包括纳米光刻、化学沉积、薄膜湿法刻蚀以及激光辅助等一系列纳米加工技术。

#### 3.1 纳米光刻技术

纳米光刻技术是制备纳米颗粒最直接的方法, 可重复性较好, 并且通过组合光刻工艺可以制



造形状复杂的纳米阵列。传统的光刻技术已成功应用于不同形状的单颗粒制备。如 Anne 等<sup>[38]</sup>组合利用电子束光刻与反应离子蚀刻技术,制造出一系列如图 4(a)所示的中空纳米圆柱体形态的 Si 纳米谐振器,其外径为 108~251 nm,中心直径大于 20 nm。通过控制这些结构的外径、高度以及壁厚等结构参数就可以实现不同的共振频率激发。更重要的是,这些纳米制造技术也可实现大规模纳米颗粒阵列的制备。Staude 等<sup>[39]</sup>利用电

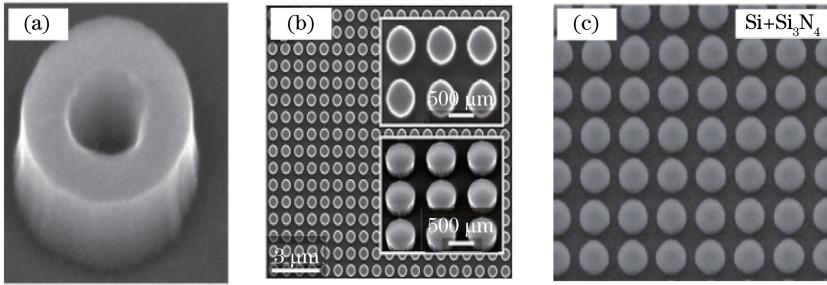


图 4 通过光刻技术制备的高折射率电介质纳米颗粒的扫描电子显微镜(SEM)图。(a)空心 Si 圆柱<sup>[38]</sup>; (b)利用基于掩模的反应离子蚀刻获得的 Si 纳米颗粒<sup>[39]</sup>; (c) Si 纳米颗粒和另外沉积的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜<sup>[40]</sup>

Fig. 4 Examples of high-index dielectric nanoparticles fabricated by lithography. (a) Scanning electron microscopy (SEM) image of hollow Si cylinder<sup>[38]</sup>; (b) Si nanoparticles obtained by means of reactive-ion-etching based on mask<sup>[39]</sup>; (c) Si nanoparticles with additionally deposited  $\text{Si}_3\text{N}_4$  thin film<sup>[40]</sup>

纳米光刻方法的可靠性高,制备简单纳米颗粒阵列时具有良好的再现性,同时具备制造复杂结构的能力和优良的分辨率。但是,在制造球形纳米颗粒时,制造过程很难控制,而且工艺复杂、成本较高。

### 3.2 化学沉积技术

化学沉积技术常用于大面积或高性能要求的纳米颗粒制备,通常是高温下发生化学反应。如高温下通过化学反应: $\text{Si}_2\text{H}_6 \longrightarrow 2\text{Si}(\text{s}) + 3\text{H}_2(\text{g})$ 将乙硅烷气体( $\text{Si}_2\text{H}_6$ )分解成固体硅和氢气,所制备的 Si 纳米颗粒如图 5(a)所示<sup>[41]</sup>。Proust 等<sup>[42]</sup>利用碱

子束光刻技术和反应离子蚀刻技术在绝缘硅晶片上制备了如图 4(b)所示的 Si 纳米颗粒阵列,并且可以通过改变阵列结构的几何参数精确地调谐 Mie 共振波长。Spinelli 等<sup>[40]</sup>则组合利用衬底保形软压印光刻与反应离子蚀刻技术在硅晶片上实现了包括 Si 纳米颗粒与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  层组合的更复杂的纳米结构,如图 4(c)所示。该技术制备的纳米结构实现了在 450~900 nm 的宽光谱范围内平均反射率小于 3% 的功能。

性化学蚀刻技术与电子束光刻技术制备出结晶硅 Mie 谐振器,还可以制备低聚物。此外,通过利用高温下超临界正己烷中分解三硅烷( $\text{Si}_3\text{H}_8$ )可以实现如图 5(b)所示的单分散 Si 胶体的制备<sup>[43]</sup>,通过改变丙硅烷浓度和反应温度从而获得不同尺寸的纳米颗粒,其中  $\Gamma$  为 Si 纳米颗粒六方晶格的  $\Gamma$  点,  $X$ 、 $J$  为以  $\Gamma$  点为原点的坐标轴。这些 Si 纳米颗粒可以通过自组装排列成六方晶格。这种技术的主要缺点是纳米颗粒的孔隙率和氢含量高,需要额外的图案化方法来制造功能结构。

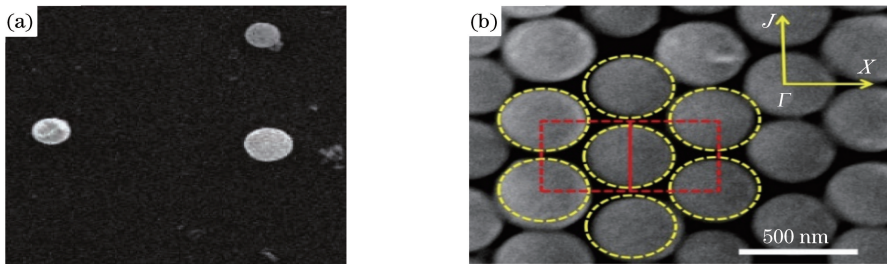


图 5 Si 胶体及 Si 纳米颗粒的 SEM 图。(a) Si 胶体的高倍放大 SEM 图像<sup>[41]</sup>; (b)通过化学沉积获得的自对准 Si 纳米颗粒<sup>[43]</sup>

Fig. 5 SEM images of Si colloids and Si nanoparticles. (a) High-magnification SEM images of silicon colloids<sup>[41]</sup>; (b) self-aligned silicon nanoparticles obtained by chemical deposition<sup>[43]</sup>

虽然化学沉积技术有很多固有的缺点,如产生化学废物、污染纳米材料、制备工艺复杂等限制了其

可能应用的领域,但化学方法仍然是一种主流制造技术。



### 3.3 薄膜湿法刻蚀技术

薄膜湿法刻蚀技术是另一种可用于大规模制备高折射率纳米颗粒的工艺。利用薄膜表面能量最小化原理,通过加热薄膜使包括薄膜-基底界面在内的薄膜表面在加热过程中总能量最小化,促使纳米颗粒在该过程中聚集。这种情况下,纳米颗粒可以是结晶的并且其侧面沿着结晶面对齐。在加热薄晶体<sup>[44]</sup>或非晶硅膜<sup>[45]</sup>之后,薄膜湿法刻蚀技术已经用于制备不同尺寸的 Si 纳米颗粒。Abbarchi 等<sup>[44]</sup>利用该技术制备了如图 6(a)所示的复杂硅单晶谐振器组件。但是,纳米颗粒的尺寸和位置控制仅能通过使用额外的光刻技术实现,比化学沉积技术更为复杂。实际上,化学沉积技术和薄膜湿法刻蚀技术更适用于高产量和低成本的纳米颗粒制备。Zhang 等<sup>[46]</sup>利用薄膜去湿法刻蚀技术在热去湿后获得了如图 6(b)所示的双组分 SiGe 纳米颗粒。这种方法制成的谐振器阵列可用于整个可见光谱范围内的颜色通带滤波器。

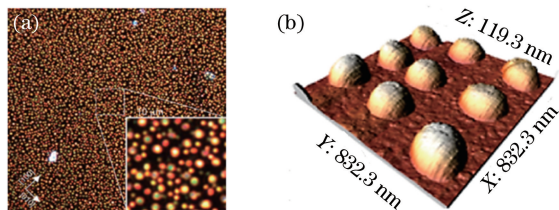


图 6 Si 纳米颗粒的暗场光学图及 SiGe 纳米颗粒的原子力显微镜(AFM)图。(a)通过薄膜去湿法刻蚀获得的 Si 纳米颗粒的暗场光学图<sup>[44]</sup>; (b)热去湿后接收阵列中的 SiGe 纳米颗粒的 AFM 图<sup>[46]</sup>

Fig. 6 Dark-field optical image of Si nanoparticles and atomic force microscope (AFM) image of SiGe nanoparticles. (a) Dark-field optical image of Si nanoparticles obtained by thin film dewetting<sup>[44]</sup>; (b) AFM image of SiGe nanoparticles in array received after thermal dewetting<sup>[46]</sup>

虽然薄膜湿法刻蚀技术是制备高折射率纳米颗粒的高效方法,但是纳米颗粒在样品表面上某些位置的可控排列仍然是该方法的主要问题。

### 3.4 激光加工技术

纳米技术的快速发展要求制造工艺精度不断提高。激光加工技术由于其高分辨率、高加工效率以及对材料没有选择性等优势被认为是纳米制造技术的最佳选择。自 2013 年以来,制造尺寸大于 100 nm 的高折射率纳米颗粒实现可见光和近红外区域的 Mie 共振需求进一步刺激了激光加工技术的应用。该领域的研究最近才刚刚开始,而激光加

工方法主要用于晶体硅纳米颗粒的制备。

通过激光烧蚀实验首次利用激光加工技术制备出高折射率纳米颗粒。Fu 等<sup>[47]</sup>利用超短激光脉冲聚焦在硅表面上将材料加热到临界点,使材料碎裂成球形纳米颗粒并且沉积在加热区域附近,制备了如图 7(a)所示的 Si 纳米颗粒。其中,影响烧蚀形成的 Si 纳米颗粒特性的关键参数有 3 个,即激光强度、光束空间分布和样品厚度。此外,Okamoto 等<sup>[48]</sup>利用超流体氦中的激光烧蚀成功地制造了单晶亚微米和微米尺寸的 ZnO、CdSe、ZnSe 和 CeO<sub>2</sub> 微球,如图 7(b)、(c)所示。这些实验证明了激光烧蚀方法用于制备在可见光和红外光谱范围内具有优良光学响应(散射效率高、品质因子高等)的高折射率纳米颗粒是有效的。然而,激光烧蚀方法无法很好地控制纳米颗粒的尺寸及其位置。为了克服这些问题,其他的激光加工技术得到了发展。

Bohandy 等<sup>[49]</sup>在 80 年代提出了激光诱导转移(LIT)的方法,用以打印不同的金属和半导体纳米颗粒。在该方法中,激光辐射聚焦在印刷材料和透明供体基板之间的界面上,从而促使材料转移到与供体样品紧密接触放置的另一个接收基板上。

Zywietz 等<sup>[50]</sup>首次利用激光打印技术制备了在可见光范围内具有 Mie 共振响应的 Si 纳米颗粒,如图 8(a)所示。此外,利用超短激光脉冲对制备的 Si 纳米颗粒进行后续照射处理,从而可控地改变其晶相进而调整其光学性质,得到的暗场显微图像如图 8(b)所示,其中白线内的 Si 纳米颗粒通过额外的激光脉冲照射而结晶,产生可见的颜色变化。

虽然激光加工技术可以精确地控制纳米颗粒的尺寸以及位置,但这需要高质量的激光脉冲,如稳定的脉冲能量、完美的光束形状、出色的聚焦技术以及高精度的定位技术。然而,这些限制并没有削弱激光辅助加工技术的基本优势,如单步工艺、高重复性、纳米颗粒晶相可改性等,这些对于实现纳米光子器件非常重要。

## 4 全电介质纳米颗粒的应用

### 4.1 全电介质纳米颗粒在纳米谐振器中的应用

在呈电性的金属中,其介电常数实部在光学频率下是负的( $\epsilon < 0$ )。与之类似,呈磁性的金属其磁导率的实部也是负的( $\mu < 0$ )。对于构建负介电常数和负磁导率材料来说,金属模块似乎是必不可少的<sup>[51]</sup>,但是在光学频率下有着很高的热损耗。然而,使用 Si、Ge 或 Te 等高折射率半导体材料制成

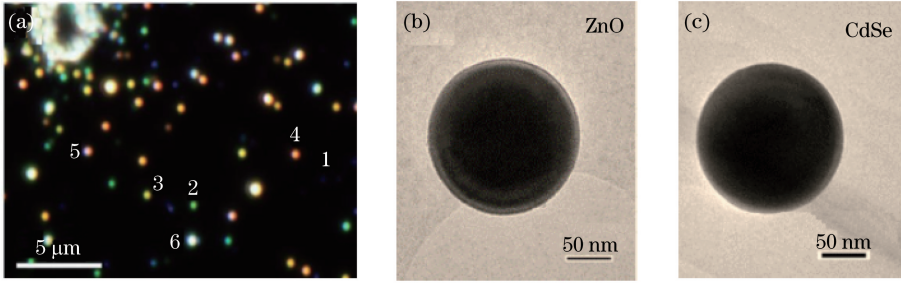


图 7 通过激光烧蚀方法制造的高折射率电介质纳米颗粒的实例。(a)通过飞秒激光烧蚀体硅获得的 Si 纳米颗粒的暗场光学图<sup>[47]</sup>; (b) ZnO 亚微球的透射电子显微镜(TEM)图<sup>[48]</sup>; (c) CdSe 亚微球的 TEM 图<sup>[48]</sup>

Fig. 7 Examples of high-index dielectric nanoparticles fabricated by laser ablation method. (a) Dark-field optical image of silicon nanoparticle obtained via femtosecond laser ablation of bulk silicon<sup>[47]</sup>; (b) transmission electron microscope (TEM) image of ZnO submicrosphere<sup>[48]</sup>; (c) TEM image of CdSe submicrosphere<sup>[48]</sup>

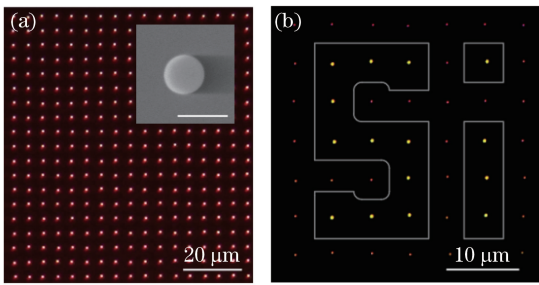


图 8 通过 LIT 方法制备的 Si 纳米颗粒的暗视野显微图<sup>[50]</sup>。(a)通过 LIT 方法制获得的非晶 Si 纳米颗粒阵列;(b)通过飞秒激光打印的 Si 纳米颗粒

Fig. 8 Examples of silicon nanoparticles fabricated by LIT method<sup>[50]</sup>. (a) Array of amorphous Si nanoparticles fabricated by LIT method and visualized with dark-field microscopy; (b) femtosecond laser printed Si nanoparticles

的如图 9(a)所示的全电介质纳米谐振器可以克服这一基本问题<sup>[52]</sup>,显示出强电磁共振。当使用频率低于或接近材料带隙频率的光波入射到高折射率纳米颗粒表面时,纳米颗粒的磁偶极子(第一个 Mie 共振)以及电偶极子(第二个 Mie 共振)可激发使其表现为电磁偶极共振<sup>[37]</sup>。这些 Mie 共振在线性响应状态下表现为特征共振色散<sup>[53-54]</sup>,如图 9(b)所示<sup>[52]</sup>,因此可通过电场共振时的有效负介电常数和磁场共振时的有效负磁导率来描述球体、圆盘或立方体阵列的整体性质<sup>[55]</sup>。图 9(c)所示为立方形 Te 谐振器阵列的反射和透射光谱,其中两个独立的峰和谷对应于中红外光谱范围内的电和磁共振<sup>[21]</sup>,插图为制备的部分 Te 谐振器阵列显微图像。

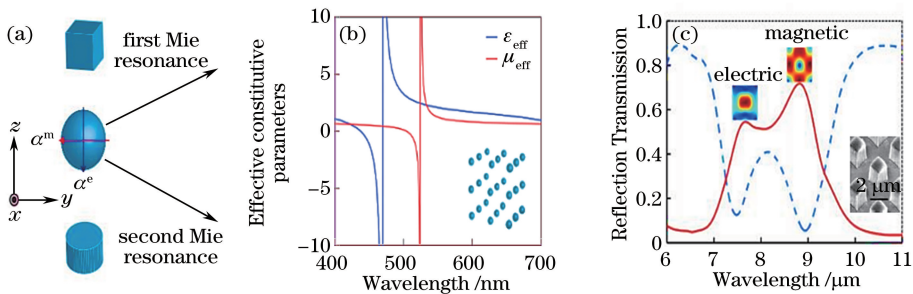


图 9 高折射率半导体材料纳米谐振器的共振特性。(a)高折射率电介质组成的立方形,球形或盘形谐振器<sup>[52]</sup>; (b)有效的负磁导率  $\mu_{\text{eff}}$  和有效的负介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$ <sup>[52]</sup>; (c)在电或磁共振附近,高折射率谐振器的二维阵列的反射和透射光谱<sup>[21]</sup>

Fig. 9 Resonant characteristics of nano-resonators with high index semiconductor materials. (a) Cubic, spherical or disc-shaped resonators composed of high-index dielectric<sup>[52]</sup>; (b) effective negative magnetic permeability  $\mu_{\text{eff}}$  and effective negative dielectric permittivity  $\epsilon_{\text{eff}}$ <sup>[52]</sup>; (c) reflection and transmission spectra of two-dimensional arrays of tellurium resonators near electric or magnetic resonance<sup>[21]</sup>

全电介质 Mie 谐振器得到发展以后立即应用于完美反射镜<sup>[56-57]</sup>和磁镜<sup>[58-60]</sup>等。这些光学器件

的工作原理与传统的反射镜不同。银制和铝制的镜子可以反射大部分入射光,但是仍然有 2% 的入射

光以热的形式耗散。此外,布拉格反射镜也可用作良好的反射镜,但是难以小型化且成本昂贵。研究人员通过实验测量了 Si 纳米谐振器的近红外光谱,表明由高折射率 Si 纳米谐振器组成的全电介质超曲面在谐振频率下亚波长厚度内可实现 100% 反射<sup>[56-57]</sup>。另外,由于 Fano 共振的强光谱选择性,全电介质纳米谐振器也为蛋白质的生物传感<sup>[61]</sup>和石墨烯等超薄材料中的光吸收增强<sup>[62]</sup>提供了契机。

#### 4.2 全电介质纳米颗粒在光学纳米天线中的应用

天线是一种在射频和微波波段通过振荡电流发射辐射的电磁辐射源。自 19 世纪 90 年代天线发明以来,研究人员已经提出了不同类型的天线并证明了其对电磁辐射的有效控制<sup>[59]</sup>。传统天线作为电磁辐射的源和变换元件,其尺寸需要与工作波长相当。随着纳米加工技术的发展,允许将射频天线的概念引入到光频段。纳米天线能够有效地在特定方

向上发射光波,并将其在纳米尺度下转换为局部亚波长模式<sup>[58]</sup>,这使得纳米天线可在多个领域应用。目前,纳米天线主要用于近场显微镜<sup>[60]</sup>、高分辨率生物医学传感器<sup>[63]</sup>、光伏<sup>[64]</sup>和医学<sup>[65]</sup>等方面。下面介绍全电介质纳米颗粒在光学纳米天线中的应用。

2011 年,Krasnok 等<sup>[66]</sup>首次提出了全电介质纳米天线的布局方法。另外,他们的工作表明特定结构的 Si 纳米颗粒可以在光学波长范围内实现惠更斯元的功能,如图 10(a)所示<sup>[67]</sup>,并且由于存在电磁共振模式,这种纳米天线能够在前后方向之间切换辐射图案。同时,还证明将 Si 纳米颗粒排列在 Yagi-Uda 几何结构中可以创建高效且超指向性的光学纳米天线,如图 10(b)所示<sup>[67]</sup>。与等离子体天线相比,全电介质 Yagi-Uda 纳米天线表现出更好的辐射效率,同时允许更加紧凑的结构设计。

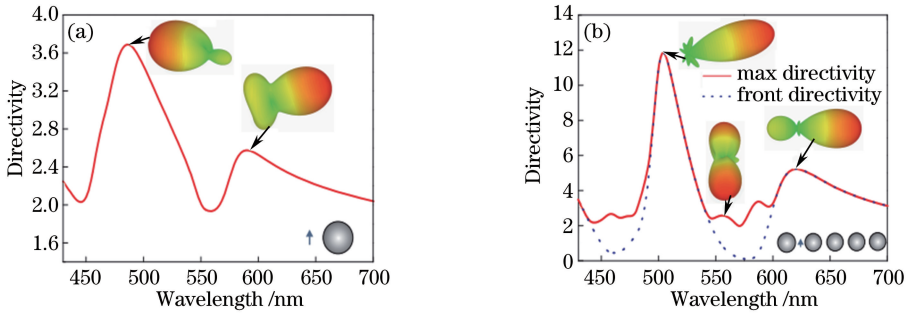


图 10 两种类型的全电介质纳米天线方向性的波长依赖性<sup>[67]</sup>。(a)单个电介质纳米颗粒；(b)分离距离  $D=70$  nm 时 Yagi-Uda 型结构

Fig. 10 Wavelength dependence of directivity of two types of all-dielectric nano-antennas<sup>[67]</sup>. (a) Single dielectric nanoparticle; (b) Yagi-Uda-type structure when separation distance  $D$  is 70 nm

全电介质纳米颗粒独特的光学性质以及低热损耗等优点使其成为制备高性能纳米天线及其他新型全电介质纳米光子器件的理想选择,而这种独特功能的关键在于全电介质纳米颗粒在亚波长尺度内同时支持电磁共振<sup>[39]</sup>。在特定方向上实现高辐射是光学纳米天线领域中非常重要的问题<sup>[58]</sup>,而实现特定方向上的高辐射最直接的方法之一是基于上述 Yagi-Uda 几何结构中的纳米颗粒的电磁共振。然而,一种更加通用的方法是基于激发纳米天线中的高阶多模。

Krasnok 等<sup>[68]</sup>基于亚波长全电介质纳米颗粒中高阶磁性多极矩激发理论设计了如图 11 所示的超指向纳米天线。通过将发射器(如量子点)放置在 Si 纳米颗粒表面上产生的小凹口内来实现超指向,该研究表明球形纳米颗粒的这种小修改可有效地激发高阶磁性多极模式。

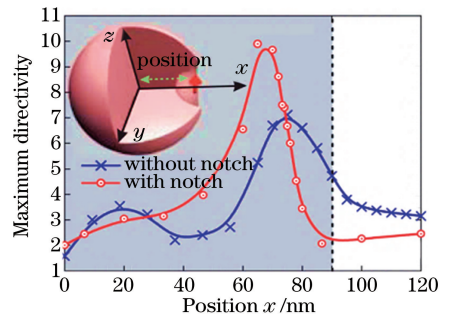


图 11 455 nm 波长处超指向硅纳米天线最大方向性与偶极源位置的依赖关系<sup>[68]</sup>

Fig. 11 Maximum directivity of super-directive nano-antenna versus position of dipole source at wavelength of 455 nm<sup>[68]</sup>

#### 4.3 全电介质纳米颗粒在超材料和超表面中的应用

光在传统的光学元件传播过程中依赖于逐渐累



积相移形成光束,而在特定的纳米结构中,光波可以突然改变相位,引入新的自由度。可实现这种功能的纳米结构常被称作超表面或超材料。自2000年以来,超材料一直是人们研究的热点,它是一种具有奇异电磁特性的人造介质,也是一种为了达到所需特定功能而专门创建的材料。尽管超材料的研究始于寻找具有负折射率、零折射率、手性等功能的光学元件,但是在亚波长尺度下对光波振幅、相位和极化

的任意控制显得更为重要<sup>[69-70]</sup>。研究人员已经利用Si纳米颗粒与介质薄膜构成了全电介质超表面,这些二维表面可以改变入射光的波前,已经在诸如透镜<sup>[71-73]</sup>、偏振器<sup>[74]</sup>、光束整形<sup>[75-76]</sup>等方面应用。与等离子体纳米颗粒构成的超表面相比,这些元件的全电介质性可以确保其在实际应用中热损耗极低,同时具有更高的透射率和衍射效率。图12所示为几种常见的超材料结构<sup>[77-78,57,40]</sup>。

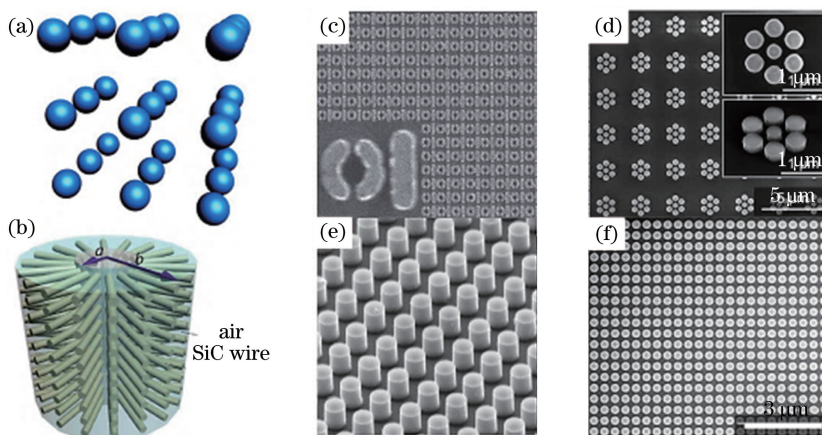


图12 几种常见超材料结构。(a)(b)基于球形和圆柱形颗粒的全电介质超材料<sup>[77]</sup>; (c)~(f)全电介质超表面<sup>[78,57,40]</sup>

Fig. 12 Several common metamaterial structures. (a)(b) All-dielectric metamaterial based on spherical and cylindrical particles<sup>[77]</sup>; (c)-(f) all-dielectric metasurfaces<sup>[78,57,40]</sup>

#### 4.4 全电介质纳米颗粒在非线性纳米光子学中的应用

纳米尺度下增强非线性光学响应一直以来是纳米光子学领域的研究热点之一。传统非线性材料的非线性光学响应系数很小,因此,要想得到大的非线性光学响应则需要很长的工作距离。寻找一种具有大的非线性响应的材料是实现纳米尺度下增强非线性光学响应的途径之一,其中全电介质材料已经用于各种微器件。如由Si纳米颗粒制成的Si基微器件(波导、环谐振器、光子晶体等)已成功地应用于拉曼激光的产生<sup>[79]</sup>、超连续光谱的产生<sup>[80]</sup>、全光开关<sup>[81-82]</sup>等。事实上,许多电介质材料(特别是半导体)在可见光与近红外波段的非线性响应与金属相当,甚至某些电介质材料(如GaAs、GaP、Te等)由于非对称的晶格结构,其非线性响应更大。

全电介质纳米颗粒在非线性纳米光子学中最有吸引力的应用之一是高效的频率转换。2014年,Shcherbakov等<sup>[26]</sup>展示了利用Si纳米颗粒阵列(纳米盘形式)生成增强的三次谐波(THG),如图13(a)所示,该纳米颗粒阵列表现出强烈的电磁偶极共振。从图13(a)中可以看出,磁偶极共振波长附近Si纳

米颗粒阵列的二次谐波效率比非结构化块体硅板高了2个数量级。利用Si纳米颗粒电磁偶极共振行为的另一个有趣的非线性效应是电子-空穴等离子体光激发。由于硅是半导体,正常条件下其导带几乎是空的。然而,通过光吸收可使其电子填充导带,从而改变半导体硅的介电常数和光学响应<sup>[83]</sup>。最近,采用等离子体光激发来调节Si纳米天线在可见光与近红外波段的光学性质<sup>[27,29]</sup>的研究已有报道。Baranov等<sup>[29]</sup>研究表明等离子体光激发允许同时操纵纳米颗粒的电磁响应,使其散射图和散射截面发生显著变化,图13(b)显示了在激光脉冲中心到达前后,前向散射和后向散射比值(FBR)与脉冲强度关系。

## 5 结束语

回顾了全电介质纳米光子学领域的发展,研究了高折射率全电介质纳米颗粒与光相互作用时的电磁Mie共振效应,详细讨论了具有电磁Mie共振特性的电介质纳米颗粒的光学性质,介绍了常见纳米颗粒的制备方法。此外,还回顾了全电介质纳米颗粒在高折射率纳米谐振器、光学纳米天线、超

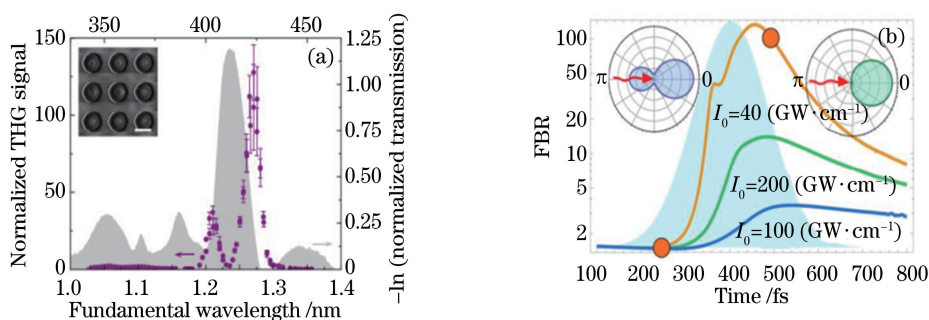


图 13 Si 纳米盘阵列的三次谐波(THG)光谱及 Si 纳米天线方向性。(a)纳米盘阵列的 THG 光谱(紫点)及线性透射光谱(灰色区域)<sup>[26]</sup>;(b)通过光激发动态重构 Si 纳米天线方向性(两个插图显示了具有最大强度的入射光束的散射图)<sup>[29]</sup>

Fig. 13 Spectrum for third harmonic generation (THG) of Si nanodisk array and directionality of Si nano-antenna. (a) THG spectrum of nanodisk array(purple dots)and linear transmission spectrum (gray area)<sup>[26]</sup>; (b)dynamical reconfiguration of Si nano-antenna directivity via photoexcitation, and scattering diagrams of incident beam at largest intensity shown in two insets<sup>[29]</sup>

材料和超表面以及非线性纳米光子学方面的实际应用。全电介质纳米颗粒作为一种新型的纳米光子器件具有许多优点,包括电磁共振增强特性和低能耗散。此外,在线性光学和非线性光学领域实现了许多新奇的功能,与等离子体纳米颗粒相比,更利于集成。

期望未来全电介质纳米颗粒的研究着眼于纳米颗粒的可调谐、非线性和有源性等性质,通过在亚波长尺度上构造功能材料实现包括参数放大、光学传感、超快光调制、非线性有源介质以及纳米激光器等方面的实际应用。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang G Q, Lan C W, Bian H L, *et al.* Flexible, all-dielectric metasurface fabricated via nanosphere lithography and its applications in sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 22038-22045.
- [2] Landau L D, Lifshitz E M. Steady current: chapter III [M]. Landau L D, Lifshitz E M. *Electrodynamics of Continuous Media*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1984.
- [3] Merlin R. Metamaterials and the Landau-Lifshitz permeability argument: large permittivity begets high-frequency magnetism [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(6): 1693-1698.
- [4] Grigorenko A N, Geim A K, Gleason H F, *et al.* Nanofabricated media with negative permeability at visible frequencies [J]. *Nature*, 2005, 438 (7066): 335-338.
- [5] Shalaev V M. Optical negative-index metamaterials

- [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 41-48.
- [6] Silveirinha M, Engheta N. Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero (ENZ) media [J]. *Physical Review B*, 2007, 75(7): 075119.
- [7] Hentschel M, Schäferling M, Weiss T, *et al.* Three-dimensional chiral plasmonic oligomers [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(5): 2542-2547.
- [8] Plum E, Zhou J, Dong J, *et al.* Metamaterial with negative index due to chirality [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(3): 035407.
- [9] Kauranen M, Zayats A V. Nonlinear plasmonics [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 737-748.
- [10] Ren M X, Xu J J. Surface plasmon polariton enhanced nonlinearity and applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080002.  
任梦昕, 许京军. 表面等离子体激元增强非线性的原理及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080002.
- [11] Kneipp K, Wang Y, Kneipp H, *et al.* Single molecule detection using surface-enhanced raman scattering (SERS) [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(9): 1667-1670.
- [12] Nie S. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Science*, 1997, 275(5303): 1102-1106.
- [13] Wang Y, Wang X, Li L W. Properties of light trapping of thin film solar cell based on surface plasmon polaritons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 092401.  
王玥, 王暄, 李龙威. 基于表面等离激元薄膜太阳能电池陷光特性的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 092401.

- [14] Soukoulis C M, Koschny T, Zhou J F, *et al.* Magnetic response of split ring resonators at terahertz frequencies[J]. *Physica Status Solidi (b)*, 2007, 244(4): 1181-1187.
- [15] Hopkins B, Miroshnichenko A E, Kivshar Y S. All-dielectric nanophotonic structures: exploring the magnetic component of light (Chapter 10) [M]. Hopkins B, Miroshnichenko A E, Kivshar Y S. *Recent Trends in Computational Photonics*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [16] Evlyukhin A B, Reinhardt C, Seidel A, *et al.* Optical response features of Si-nanoparticle arrays [J]. *Physical Review B*, 2010, 82(4): 045404.
- [17] Mie G. Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen[J]. *Annalen Der Physik*, 1908, 330(3): 377-445.
- [18] Wheeler M S, Aitchison J S, Mojahedi M. Three-dimensional array of dielectric spheres with an isotropic negative permeability at infrared frequencies [J]. *Physical Review B*, 2005, 72(19): 193103.
- [19] Popa B I, Cummer S A. Compact dielectric particles as a building block for low-loss magnetic metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207401.
- [20] Schuller J A, Zia R, Taubner T, *et al.* Dielectric metamaterials based on electric and magnetic resonances of silicon carbide particles [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(10): 107401.
- [21] Ginn J C, Brener I, Peters D W, *et al.* Realizing optical magnetism from dielectric metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(9): 097402.
- [22] Rolly B, Bebey B, Bidault S, *et al.* Promoting magnetic dipolar transition in trivalent lanthanide ions with lossless Mie resonances [J]. *Physical Review B*, 2012, 85(24): 245432.
- [23] Albella P, Poyli M A, Schmidt M K, *et al.* Low-loss electric and magnetic field-enhanced spectroscopy with subwavelength silicon dimers [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(26): 13573-13584.
- [24] Dmitriev P A, Baranov D G, Milichko V A, *et al.* Resonant Raman scattering from silicon nanoparticles enhanced by magnetic response [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(18): 9721-9726.
- [25] Krasnok A, Glybovski S, Petrov M, *et al.* Demonstration of the enhanced Purcell factor in all-dielectric structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(21): 211105.
- [26] Shcherbakov M R, Neshev D N, Hopkins B, *et al.* Enhanced third-harmonic generation in silicon nanoparticles driven by magnetic response [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6488-6492.
- [27] Makarov S, Kudryashov S, Mukhin I, *et al.* Tuning of magnetic optical response in a dielectric nanoparticle by ultrafast photoexcitation of dense electron-hole plasma [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 6187-6192.
- [28] Shcherbakov M R, Vabishchevich P P, Shorokhov A S, *et al.* Ultrafast all-optical switching with magnetic resonances in nonlinear dielectric nanostructures [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(10): 6985-6990.
- [29] Baranov D G, Makarov S V, Milichko V A, *et al.* Nonlinear transient dynamics of photoexcited resonant silicon nanostructures [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(9): 1546-1551.
- [30] Maier S A. Plasmonic field enhancement and SERS in the effective mode volume picture [J]. *Optics Express*, 2006, 14(5): 1957-1964.
- [31] Bharadwaj P, Deutsch B, Novotny L. Optical antennas [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(3): 438-483.
- [32] Agio M. Optical antennas as nanoscale resonators [J]. *Nanoscale*, 2012, 4(3): 692-706.
- [33] Seok T J, Jamshidi A, Kim M, *et al.* Radiation engineering of optical antennas for maximum field enhancement [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(7): 2606-2610.
- [34] Khurgin J B. How to deal with the loss in plasmonics and metamaterials [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(1): 2-6.
- [35] Kivshar Y, Miroshnichenko A. Meta-optics with Mie resonances [J]. *Optics and Photonics News*, 2017, 28(1): 24-31.
- [36] Vuye G, Fisson S, Van V N, *et al.* Temperature dependence of the dielectric function of silicon using in situ spectroscopic ellipsometry [J]. *Thin Solid Films*, 1993, 233(1/2): 166-170.
- [37] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and scattering of light by small particles* [M]. Canada: John Wiley & Sons, 1983.
- [38] Anne V D H M, Jorik V D G, Brenny B J M, *et al.* Controlling magnetic and electric dipole modes in hollow silicon nanocylinders [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2047-2064.
- [39] 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.
- [40] Spinelli P, Verschuuren M A, Polman A. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators [J]. Nature Communications, 2012, 3(2): 692-692.
- [41] Shi L, Tuzer T U, Fenollosa R, *et al.* A new dielectric metamaterial building block with a strong magnetic response in the sub-1.5-micrometer region: silicon colloid nanocavities [J]. Advanced Materials, 2012, 24(44): 5934-5938.
- [42] Proust J, Bedu F, Chenot S, *et al.* Chemical alkaline etching of silicon Mie particles [J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(9): 1280-1286.
- [43] Shi L, Harris J T, Fenollosa R, *et al.* Monodisperse silicon nanocavities and photonic crystals with magnetic response in the optical region [J]. Nature Communications, 2013, 4(5): 1904-1910.
- [44] Abbarchi M, Naffouti M, Vial B, *et al.* Wafer scale formation of monocrystalline silicon-based Mie resonators via silicon-on-insulator dewetting [J]. ACS Nano, 2014, 8(11): 11181-11190.
- [45] Naffouti M, David T, Benkouider A, *et al.* Fabrication of poly-crystalline Si-based Mie resonators via amorphous Si on SiO<sub>2</sub> dewetting [J]. Nanoscale, 2016, 8(14): 2844-2849.
- [46] Zhang P P, Yang B, Rugheimer P P, *et al.* Influence of germanium on thermal dewetting and agglomeration of the silicon template layer in thin silicon-on-insulator [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(17): 175309.
- [47] Fu Y H, Kuznetsov A I, Miroshnichenko A E, *et al.* Directional visible light scattering by silicon nanoparticles [J]. Nature Communications, 2013, 4(2): 1527-1533.
- [48] Okamoto S, Inaba K, Iida T, *et al.* Fabrication of single-crystalline microspheres with high sphericity from anisotropic materials [J]. Scientific Reports, 2014, 4(4): 5186-5190.
- [49] Bohandy J, Kim B F, Adrian F J, *et al.* Metal deposition at 532 nm using a laser transfer technique [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(4): 1158-1162.
- [50] Zywiets U, Evlyukhin A B, Reinhardt C, *et al.* Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses [J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 3402-3409.
- [51] Cai W S, Shalaev V. Optical metamaterials: fundamentals and applications [M]. New York: Springer Science and Business Media, 2009.
- [52] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials [J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(1): 23-36.
- [53] Lewin L. The electrical constants of a material loaded with spherical particles [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering, 1947, 94(27): 65-68.
- [54] Ahmadi A, Mosallaei H. Physical configuration and performance modeling of all-dielectric metamaterials [J]. Physical Review B, 2008, 77(4): 045104.
- [55] Moitra P, Slovick B A, Li W, *et al.* Large-scale all-dielectric metamaterial perfect reflectors [J]. ACS Photonics, 2015, 2(6): 692-698.
- [56] Moitra P, Slovick B A, Zhi G Y, *et al.* Experimental demonstration of a broadband all-dielectric metamaterial perfect reflector [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(17): 171102.
- [57] Esfandyarpour M, Garnett E C, Cui Y, *et al.* Metamaterial mirrors in optoelectronic devices [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(7): 542-547.
- [58] Schwanecke A S, Fedotov V A, Khardikov V V, *et al.* Optical magnetic mirrors [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9(1): L1-L2.
- [59] Fedotov V A, Rogacheva A V, Zheludev N I, *et al.* Mirror that does not change the phase of reflected waves [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(9): 091119.
- [60] Wu C H, Khanikaev A B, Adato R, *et al.* Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers [J]. Nature Materials, 2012, 11(1): 69-75.
- [61] Piper J R, Fan S H. Total absorption in a graphene monolayer in the optical regime by critical coupling with a photonic crystal guided resonance [J]. ACS Photonics, 2014, 1(4): 347-353.
- [62] Zhang S P, Bao K, Halas N J, *et al.* Substrate-induced fano resonances of a plasmonic nanocube: a route to increased-sensitivity localized surface plasmon resonance sensors revealed [J]. Nano Letters, 2011, 11(4): 1657-1663.
- [63] Xu Z C, Li N, Duan B Y. Design of broadband spiral nanoantenna based on solar energy harvesting [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0826003.
- 徐志超, 李娜, 段宝岩. 基于太阳能收集的宽频螺旋纳米天线设计 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0826003.
- [64] Kim K, Kim J H, Park H, *et al.* Tumor-homing

- multifunctional nanoparticles for cancer theragnosis: simultaneous diagnosis, drug delivery, and therapeutic monitoring [J]. *Journal of Controlled Release*, 2010, 146(2): 219-227.
- [65] Krasnok A E, Miroshnichenko A E, Belov P A, *et al.* Huygens optical elements and Yagi—Uda nanoantennas based on dielectric nanoparticles [J]. *JETP Letters*, 2011, 94(8): 593-598.
- [66] Krasnok A E, Miroshnichenko A E, Belov P A, *et al.* All-dielectric optical nanoantennas [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20599-20604.
- [67] Krasnok A E, Filonov D S, Simovski C R, *et al.* Experimental demonstration of superdirective dielectric antenna [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(13): 133502.
- [68] Krasnok A E, Simovski C R, Belov P A, *et al.* Superdirective dielectric nanoantennas [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(13): 7354-7361.
- [69] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [70] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, *et al.* Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [71] Fattal D, Li J J, Peng Z, *et al.* Flat dielectric grating reflectors with focusing abilities [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 466-470.
- [72] Khorasaninejad M, Aieta F, Kanhaiya P, *et al.* Achromatic metasurface lens at telecommunication wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5358-5362.
- [73] Cao J G, Zhou Y X. Polarization modulation of terahertz wave by graphene metamaterial with grating structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092501.  
曹建国, 周译玄. 栅状结构石墨烯超材料的太赫兹波偏振调制[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 092501.
- [74] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, *et al.* Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [75] Shalaev M I, Sun J B, Tsukernik A, *et al.* High-efficiency all-dielectric metasurfaces for ultracompact beam manipulation in transmission mode [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 6261-6266.
- [76] Zhao Q, Zhou J, Zhang F, *et al.* Mie resonance-based dielectric metamaterials[J]. *Materials Today*, 2009, 12(12): 60-69.
- [77] Decker M, Staude I, Falkner M, *et al.* High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [78] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity[J]. *Nature*, 2002, 415(6872): 621-623.
- [79] Leuthold J, Koos C, Freude W. Nonlinear silicon photonics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 535-544.
- [80] Noskov R E, Krasnok A E, Kivshar Y S. Nonlinear metal-dielectric nanoantennas for light switching and routing[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(9): 093005.
- [81] Wu Y Y, Zhang X P, Shan X Y, *et al.* An ultrafast all-optical switch with silicon-based silica structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041303.  
吴永宇, 张小平, 单欣岩, 等. 一种硅基二氧化硅结构的超快全光开关[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 041303.
- [82] Sokolowski-Tinten K, von der Linde D. Generation of dense electron-hole plasmas in silicon [J]. *Physical Review B*, 2000, 61(4): 2643-2650.
- [83] Yang Y M, Wang W Y, Boulesbaa A, *et al.* Nonlinear fano-resonant dielectric metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(11): 7388-7393.