

Recent Application and Fabrication of Monolayer Colloidal Crystals and Their Inverse Nanostructures

Yushun Wei¹, Chunli Luo^{2,3}, Weiguo Yan⁴, Shuyu Liu⁴, Shijin Zhao²

¹Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin Ding Hua Detection Technology Company, Tianjin

²School of Control and Mechanical Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin

³School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin

⁴School of Science, Tianjin Chengjian University, Tianjin

Email: yan_weiguo@163.com

Received: Dec. 3rd, 2018; accepted: Dec. 22nd, 2018; published: Dec. 29th, 2018

Abstract

Monolayer colloidal crystals (MCCs) are two dimensional (2D) periodic arrays consisting of mono-disperse colloidal particles assembly. In recent years, MCCs and their inverse nanostructures have attracted intensive attention due to their special optical properties. In this review, we discussed some progress of controllable fabrication of large area MCCs and their inverse nanostructures. Firstly, new-developed methods of large area MCCs fabrication are introduced, such as interfacial assembly and wedge micro-channel self-assembly. Secondly, some novel nanostructures including nanopillar, nanocone, nano-volcano and so on are prepared by reactive ion beam etching and angle-resolved deposition. Lastly, we further discussed the potential application of these nanostructures.

Keywords

Monolayer Colloid Crystal, Self Assembly, Deposit, Etching, Metallic Nanostructure

单层胶体晶体及反蛋白质纳米阵列结构的制备研究

魏玉顺¹, 罗春丽^{2,3}, 闫卫国⁴, 刘姝昱⁴, 赵世锦²

¹天津市特种设备监督检验技术研究院, 天津鼎华检测科技有限公司, 天津

²天津城建大学, 控制与机械学院, 天津

³河北工业大学, 电子与信息工程学院, 天津

⁴天津城建大学, 理学院, 天津

Email: yan_weiguo@163.com

摘要

单层胶体晶体是由单分散的胶状颗粒组装形成的二维周期性微纳米阵列结构。最近几年，由于单层胶体晶体反转结构具有特有的结构及光学属性，单层胶体晶体越来越受到研究者的关注。本文围绕大面积单层胶体晶体的可控性制备进行了综述和讨论。首先，介绍了大面积单层胶体晶体的自组装方法(楔形微通道自组装法和界面自组装方法)。其次，介绍以单层胶体晶体为模板制备多种金属纳米结构，如纳米柱、纳米锥、类纳米火山纳米结构及任意形状的金属网络结构，对这些新型的金属纳米结构的潜在应用进行了讨论。

关键词

单层胶体晶体，自组装，沉积，刻蚀，金属纳米结构

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前，单层胶体球阵列及纳米阵列结构在许多领域展现出很好应用前景，如化学生物传感器、光催化、能源存储和转换材料、超疏水表面、透明电极及存储器等[1]-[8]。由于单层胶体晶体制备方法简单、无需大型制备仪器及应用前景广泛，它们越来越受到众多研究者的关注。一方面，对于高质量的二维、三维胶体球阵列可以很好实现光束的有效调控，如光子晶体；另一方面，以单层的胶体球阵列作为模板时，结合氧等离子刻蚀和角度分辨沉积技术可实现多样的金属纳米结构，这些新型的、多样的金属纳米结构在生物分子检测、太阳能电池、光电转换器件等方面取得了一些很好的研究成果。

单分散的胶体球通常是带有负电的聚苯乙烯微球或者二氧化硅微球，通过微球间的弱相互作用(如静电力、范德华力及离子键作用)在基底表面自组装形成有序的二维、三维微球阵列结构。另外，胶体球微球可借助外力的作用(如离心力、毛细力及重力)来实现大面积的微球阵列结构。因此，研究者采用各种各样的自组装方法来制备单层、可控层数及二元的胶体球阵列结构，包括滴涂法、垂直浸渍提拉法、旋涂法、斜面毛细作用组装技术及水汽界面组装法等[9] [10] [11] [12] [13]。

胶体球阵列结构结合刻蚀和沉积技术可制备出多种多样的反蛋白质结构，如纳米锥、纳米柱、纳米铅笔、纳米半环、纳米碗、纳米支叉和纳米网络等结构[14]-[19]。这种简单、低廉的制备方法在一定程度上是聚焦离子束和电子束刻蚀制备金属纳米结构方面的补充。

在这篇综述中，我们主要介绍大面积单层胶体球晶体组装的最新方法及以它们为模板制备出的反蛋白质金属结构。首先介绍目前大面积单层胶体球晶体的组装方法，通过单层的胶体球晶体为模板结合刻蚀、沉积技术实现多样的新型金属纳米结构；围绕胶体球晶体和反蛋白质的金属纳米结构的光电属性及潜在应用展开讨论，并对胶体球晶体和反蛋白质的金属纳米结构的发展前景和应用做总结和展望。

2. 大面积单层胶体球晶体的组装方法

2.1. 气液界面组装法

在众多组装方法中，气液界面组装法是制备大面积胶体球阵列结构的简单而有效方法之一。这种方

法是以水气界面作为辅助层,采用乙醇将聚苯乙烯微球溶液进行一定比例的稀释,在乙醇挥发的带动下,浮到辅助层表面的聚苯乙烯微球自组装形成阵列结构。为了更加有效的控制微球在界面的有序排列,可以通过在溶液中添加一些表面活性剂(如十二烷基硫酸钠)来降低液面的表面张力。界面上的微球在表面活性剂的推动下可控性的聚合、排列及整合,形成大面积的胶体球阵列结构。研究表明,单层的胶体球阵列结构在界面自组装过程中要受到多个因素的影响,如胶体球溶液的浓度,分散剂的比例,水面的表面张力以及胶体球溶液进入水面速度。另外,为实现大面积、高质量的单层胶体球阵列结构,必须很好控制喷射胶体球溶液的喷头与水面的距离,这样可以使其更好的漂浮在界面上,同时可以避免胶体球溶液进入水中。因此,有效地控制以上几个条件,可实现超大面积的单层胶体球阵列结构的制备。

为实现大面积的单层胶体球阵列结构,北京大学齐利民研究组采用衬底辅助胶体球界面组装方法在水气界面上形成面积超 20 cm^2 单层胶体球晶体。首先通过浸渍在水中的衬底作为辅助,乙醇稀释后的胶体球溶液缓慢地注入到水中,在衬底以及混合溶液毛细力的协同作用下,避免胶体球渗入水中,从而有效地提高界面自组装的效率。另外,在溶液表面添加一定量的十二烷基硫酸钠溶液,不仅可以降低溶液的表面张力,而且可进一步提高单层胶体球阵列结构的紧密度。最后,将浮在界面上的单层胶体球阵列结构缓慢的捞在衬底表面,在空气中自然蒸干后,在衬底上形成单层的胶体球阵列结构。中科院宁波材料研究所叶继春研究组采用微推进喷射系统将界面组装方法进一步升级,极大地提高界面组装的效率,可达到(3000片/小时)超大面积的单层胶体球阵列结构。微推进喷射系统制备大面积的聚苯乙烯纳米球阵列过程的示意图如图 1 所示。具体的方法如下:将衬底浸入到容器中水面下,同时连接微推进喷射系统的喷嘴,如图 1(a)所示。调节喷嘴和水面的接触状态位置,达到最佳状态后,启动微推进喷射系统,在水面注入胶体球溶液,如图 1(b)所示。胶体球溶液通过微推进喷射系统不断注入到水面上,直到其表面出现多彩干涉图,这说明在水面上形成单层的胶体球阵列结构,如图 1(c)所示。通过降低水面或者提升衬底,将浮在水面上的单层胶体球阵列结构捕获到衬底上,如图 1(d)所示。目前,微推进喷射系统界面自组装方法将单层的胶体球阵列结构的制备推广到工业领域,为其在产业化的推进做出了重要的贡献。

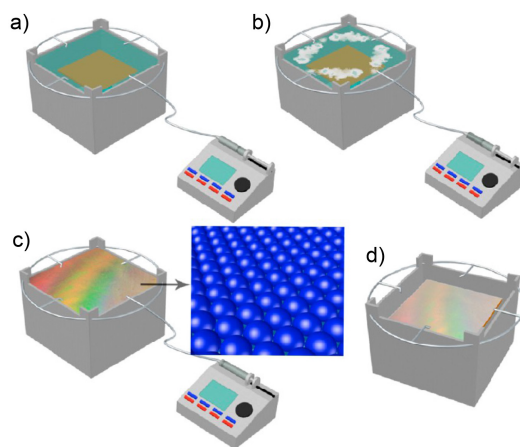


Figure 1. Schematics of the micropropulsive injection (MPI) systems and the formation processes for large-area PS nanosphere arrays in both of the lab scale (a)–(d) and manufacturing scale (e). (a) An MPI system with one injector and four nozzles. A substrate is preset underneath the water. (b) Initial stage for the injection of PS colloids over the water surface. (c) The formation of hexagonally arranged PS monolayer upon the water surface once a defectless and colorful interference pattern occurred under white light illumination. The inset image schematically shows the arranged PS monolayer. (d) Transfer of the PS-monolayer onto the preset substrates by slowly declining the water level or raising the substrate [12]

图 1. 微推进喷射系统制备大面积的聚苯乙烯纳米球阵列过程的示意图。(a) 基底提前浸渍在微推进喷射系统的水面下; (b) 初始阶段注射在水面上的聚苯乙烯纳米胶体球。(c) 在水面形成的六边形排列的 PS 单层(白光照射下所产生的多彩干涉图)。(d) 通过提高衬底或者降低水位后沉积到基板上的聚苯乙烯单层阵列结构[12]

界面自组装依据喷嘴的形状、注入方式以及界面的属性等,将胶体球溶液浮到界面上。Asher 研究组设计针尖注入法成功地制备单层的胶体球阵列结构。叶继春研究组的微推进喷射系统就是基于这种方法进行的升级。另外, Asher 研究组通过液态的汞界面作为辅助层,胶体球溶液在其表面自组装形成单层的胶体球阵列结构[20]。通过选择不同的界面属性,胶体球可在其他液面上进行可控性自组装, Wu L.等在油水界面自组装形成单层的胶体球阵列结构[21]。界面自组装法作为一种简单、有效的自组装方法,可将直径从几百纳米到几个微米的胶体球组装形成单层的胶体球阵列结构。

2.2. 楔形微通道自组装法

楔形微通道自组装法也是近几年提出的一种简单、有效的制备大面积胶体球阵列的方法,这种微通道为胶体球溶液自组装过程提供稳定的对流空间,让胶体球溶液在干燥过程中保持直线形态,从而有效地避免胶体球在自组装过程中产生团聚、叠层等不利的情况,更为有效地制备出大面积的单层胶体球阵列结构。南京大学王振林研究组采用楔形微通道自组装法成功地在平整衬底上自组装制备出二维的六边形胶体晶体(面积可达到几平方厘米),如图 2 所示[22]。楔形微通道自组装法对液面的控制要求比较高,如果液面是凹型或凸型都会导致胶体球自组装过程产生大量的缺陷,因此,通过辅助衬底可很好改善胶体球溶液在自组装过程中液面形态,即保持直线。这样通过楔形微通道成功地制备出大面积的胶体球阵列结构。南京师范大学叶永红课题组在原有楔形微通道自组装法基础上发展出重力辅助对流自组装法,利用胶体球溶液在自倾斜的楔形微通道中所受的重力以及溶液蒸发过程中的毛细力的协同作用,成功地制备出大面积的胶体球阵列结构,如图 3 所示[23]。

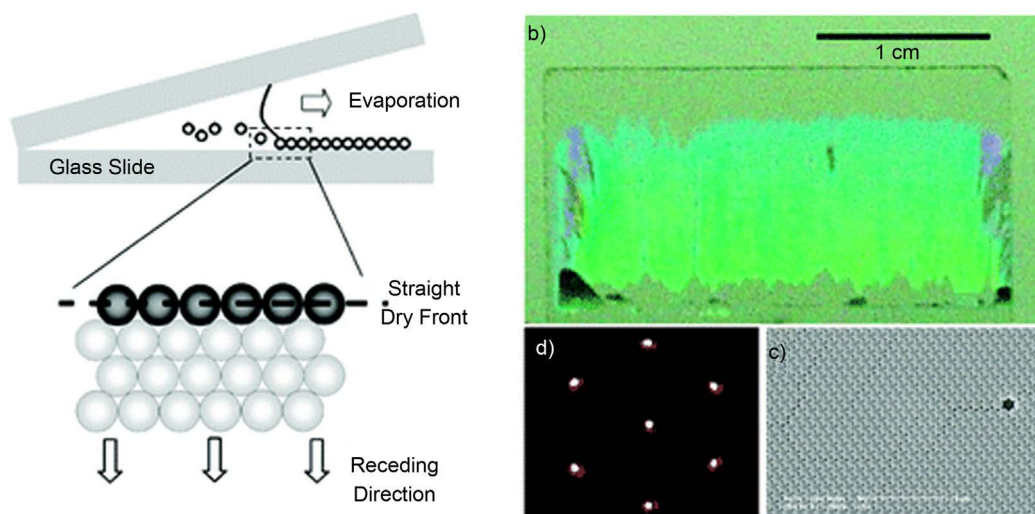


Figure 2. Schematic of the cells used to study the effect of the drying front line shape on colloidal crystal growth: (a) a wedge-shaped cell with three open sides; (b) optical images of the colloidal crystals grown; (c) SEM image of a typical area of the 2D colloidal crystals self-assembled in a wedge-shaped cell; (d) laser diffraction patterns [22]

图 2. 楔形微通道自组装法制备大面积胶体球微球阵列结构图。(a) 为胶体球溶液在楔形微通道中自组装的过程,通过这种微通道胶体球溶液的液面始终保持直线形态,从而确保胶体球在自组装过程中形成大面积的阵列结构。(b) 大面积胶体球阵列的图像。(c) 胶体球阵列的扫描电镜图。(d) 单层胶体球阵列结构的晶格衍射图样[22]

3. 基于胶体球阵列的金属纳米结构的制备

金属微-纳阵列结构材料是目前纳米光学领域的热点研究对象,由于金属与光相互作用下所产生的特殊光学现象,在表面增强拉曼散射光谱、化学和生物传感器、太阳能电池、自旋材料及非线性光学方面有较大的潜在应用价值。由于纳米球印刷技术制备方法简单、便宜、有效、快捷,很快成为制备金属

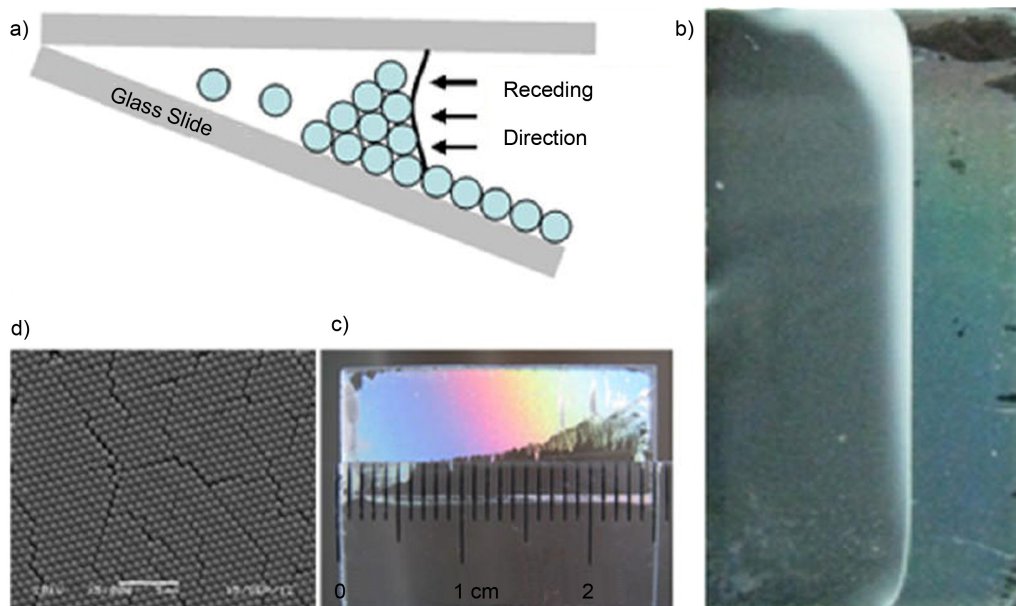


Figure 3. Schematic of the setup to fabricate large area colloid microspheres crystals by a gravity-assisted convective self-assembly method: (a) Schematic of the setup used in the study; (b) optical image of the cell right after the injection of the colloidal suspension; (c) optical image of the formed film when observed at a shallow angle; (d) SEM image of the sample [23]

图 3. 重力辅助楔形微通道对流自组装法制备大面积胶体球微球阵列结构图。(a)为胶体球溶液在楔形微通道中自组装的过程的示意图。(b)胶体球溶液在蒸发过程中液面保持的形态。(c)大面积的单层胶体球阵列结构,在白光在照射下产生的彩色干涉条纹。(d)单层胶体球阵列结构的扫描电镜图[23]

纳米阵列结构一种重要的组成部分。纳米球印刷技术,也就是胶体球阵列结构结合“自下而上”的沉积技术可在胶体球模板的间隙中实现其反演结构,早期典型的代表工作是 Christy L. Hayne 和 Richard P. Van Duyne 等人采用滴涂法成功地制备出单层及双层胶体球阵列结构,并以此为模板制备出金属纳米三角阵列及纳米颗粒阵列结构,该方法为显微技术在金属纳米阵列结构方面的研究提供可能[9]。随着纳米球印刷技术的不断发展,胶体球阵列结构结合刻蚀技术、角度分辨沉积技术已经可以可控地设计制备出各种各样的金属纳米结构。

3.1. 纳米锥阵列结构

胶体球阵列结构结合等离子刻蚀技术可在不同衬底表面制备出纳米锥、纳米柱结构。加利福尼亚大学欧文分校 Robert M. Corn 的研究组采用聚四氟乙烯板为基底材料,通过自组装方法在衬底表面制备出大面积的聚苯乙烯微球阵列结构,结合氧等离子刻蚀技术在基底表面形成有序的纳米锥结构。通过控制胶体球的尺寸可很好的控制纳米锥的结构分布,通过调节氧等离子刻蚀的时间能够有效地控制胶体球的直径的变化,如图 4 所示[15]。图 4 为纳米锥阵列结构的制备示意图,(a)是在聚四氟乙烯衬底上自组装形成的聚苯乙烯胶体球。(b)和(c)为控制氧等离子刻蚀时间所形成的纳米锥腔和纳米锥阵列结构。(d)为在聚四氟乙烯纳米锥表面溅射一层金膜。通过简单的氧等离子刻蚀技术制备出金属纳米锥阵列结构。图 4(e)~(h)分别为直径 1 μm 、750 nm、500 nm 和 350 nm 的聚苯乙烯微球通过氧等离子刻蚀后产生的纳米锥阵列的扫描电镜图。另外,对于 750 nm 的聚苯乙烯微球而言,氧等离子刻蚀的时间为 3 min 时,聚苯乙烯微球在 3 min 内无法完全刻蚀掉,但是聚四氟乙烯衬底被刻蚀成锥状分布。因此,在 3 min 分钟的刻蚀条件下,将形成纳米锥附着聚苯乙烯微球阵列结构,如图 5(a)所示。当刻蚀时间增加到 6 min 时,聚苯乙烯微球几乎被完全刻蚀掉,从而衬底上形成锥状分布,如图 4(h)所示。

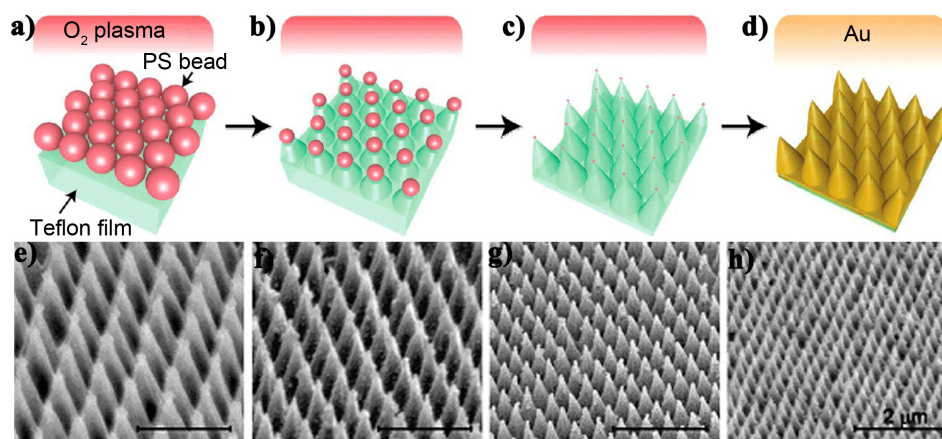


Figure 4. (a~d) Schematic illustration of the fabrication process: (a) Fabrication of a PS bead monolayer on a flexible Teflon film; (b and c) Formation of nanocone arrays by simultaneous plasma etching of PS beads and Teflon film; (d) Deposition of gold thin film on the Teflon nanocone array. (e~h) SEM images of nanocone arrays fabricated with PS beads with different diameter: (a) 1, (b) 0.75, (c) 0.5, and (d) 0.35 μm , respectively. In all the SEM images, the scale bars indicate 2 μm [15]

图 4. (a~d)是纳米锥阵列结构的制备示意图: (a)是在聚四氟乙烯衬底上自组装形成的聚苯乙烯胶体球; (b)和(c)为控制氧等离子刻蚀时间所形成的纳米锥腔和纳米锥阵列结构; (d)为在聚四氟乙烯纳米锥表面溅射一层金膜。 (e~h)分别为直径 1 μm 、750 nm、500 nm 和 350 nm 的聚苯乙烯微球通过氧等离子刻蚀后产生的纳米锥阵列的扫描电镜图[15]

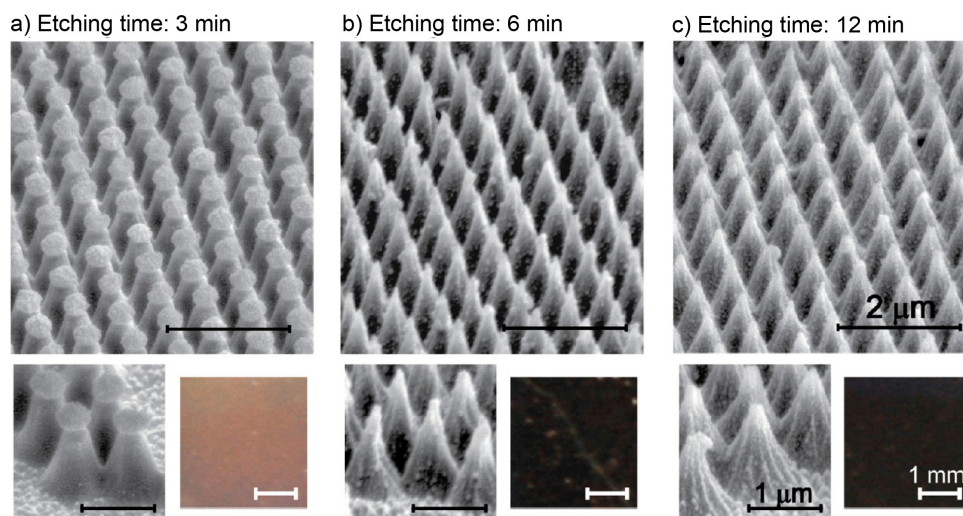


Figure 5. (a)~(c) SEM images of gold nanocone arrays (top row) and individual nanocones (left figures in bottom row) and photographs of the samples (right figures in bottom row) [15]

图 5. (a)~(c)是不同氧等离子刻蚀时间下纳米锥阵列结构的扫描电镜图(上图), 单个纳米锥的扫描电镜图(左下图)和样品的光学图像(右下图) [15]

中科院宁波材料研究所叶继春研究组通过胶体球模板结合反应离子束刻蚀技术和溶液腐蚀方法制备出硅纳米金字塔、纳米柱和纳米铅笔阵列结构。基本制备过程是首先通过界面自组装方法制备出单层胶体球阵列结构, 以此为模板结合反应离子束刻蚀技术将微球之间的间距进行有效的调节[12]; 其次, 通过磁控溅射在胶体球模板上沉积一定厚度的金属薄膜, 将在硅薄膜衬底形成胶体球复合金属薄膜的阵列结构; 再次, 将样品浸入甲苯溶液, 在超声清洗机辅助下将胶体球去掉, 将在硅衬底表面形成金属 Ti 网络结构; 最后, 通过化学刻蚀溶液在硅衬底上腐蚀形成纳米金字塔, 纳米柱结构, 同时去除硅表面的金属涂层。另外, 如果采用 Ag 辅助化学刻蚀方法重复多次上述工艺, 可在硅衬底表面形成纳米铅笔阵列结构, 如图 6 所示。

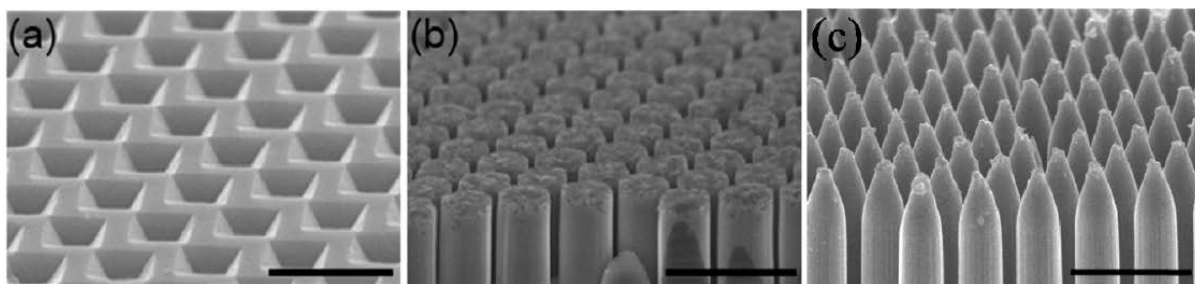


Figure 6. Several periodic surface texturing structures that are fabricated by using the PS monolayers as templates on c-Si thin film. (a)~(c) SEM images of an inverted-nanopyramid (INP) array, a nanopillar (NP) array, and a nanopencil (NPC) array [12]

图 6. 胶体球阵列结构结合化学刻蚀方法制备出硅纳米阵列结构, (a) 纳米金字塔阵列; (b) 纳米柱阵列; (c) 纳米铅笔阵列[12]

3.2. 氮化镓纳米结构的制备

半导体材料形成纳米结构时, 可以极大的提高材料的表比面积, 从而很好的提高半导体器件的发光效率。中科院半导体所的郑海洋研究组利用纳米球模板结合等离子刻蚀技术成功的制备出氮化镓的纳米柱、纳米锥及类火山的纳米结构, 很好的提高了氮化镓的发光效率[24]。图 7 为制备半导体纳米结构的制备工艺示意图及扫描电镜结果。图 7(a)在蓝宝石衬底上依次生长的 N 型氮化镓、电子传输层及 P 型氮化镓作为衬底, 在该衬底上自组装形成单层聚苯乙烯微球阵列。通过聚苯乙烯微球模板, 采用感应耦合等离子体刻蚀 P 型氮化镓, 通过控制刻蚀时间形成不同形态的氮化镓纳米结构, 包括纳米柱、纳米锥及类火山结构, 如图 7(e)~(g)。通过扫描电镜的侧面图可以清楚的看出纳米柱, 纳米锥及类火山结构的结构形态。

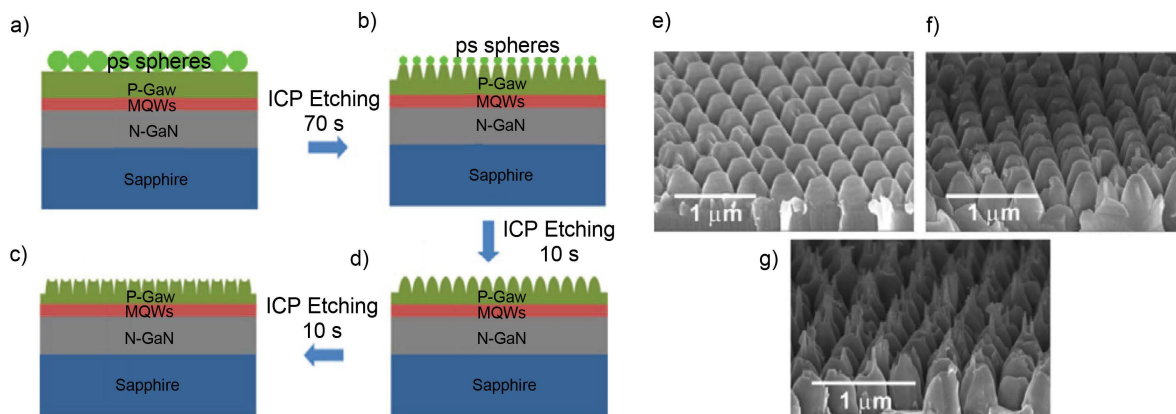


Figure 7. Schematic illustration of the fabrication process: (a) PS spheres spin-coated onto the p-GaN surface, followed by ICP etching for different durations to form (b) pillar, (c) cone, and (d) volcano PhC LEDs; tilted SEM images of (e) pillar, (f) cone (g) volcano PhC LEDs, respectively [24]

图 7. 半导体纳米结构的加工示意图和扫描电镜图。(a) 在半导体材料表面自组装形成的聚苯乙烯微球阵列。(b)~(d) 感应耦合等离子刻蚀分别刻蚀 70、80、90s 形成的纳米结构。(e)~(g) 纳米柱、纳米锥及类火山结构的扫描电镜图[24]

3.3. 可控结构的纳米网络阵列结构

胶体球阵列结构结合角度分辨沉积技术可制备出各式各样的金属纳米结构, 纳米结构的形态不仅与溅射的角度密切相关, 而且还和胶体球之间的间距密不可分。通常情况下, 从靶材表面溅射出金属纳米颗粒垂直沉积在衬底表面, 旋转衬底让金属纳米颗粒均匀的分布在衬底上。如果胶体球作为模板时, 金

属纳米颗粒将沉积在胶体球阵列结构的间隙中, 形成与胶体球阵列结构相反的结构-反蛋白质结构。当以单层的胶体球阵列结构为模板时, 其反蛋白质结构呈现出三角金字塔结构。如果能够很好控制沉积的角度, 就可以在衬底表面形成多样金属结构(如双三角, 伞)。Richard P. Van Duyne 在 80 年代已经提出了角度分辨沉积技术, 并且制备出两个相互重叠的三角阵列结构[25]。南京大学王振林研究组通过严格控制沉积的方向以及靶材与衬底间的距离, 成功地制备出双三角阵列结构[26]。近期, 哈佛大学的 George M. Whitesides 研究组将角度分辨沉积技术进一步提高, 利用氧等离子将胶体球的间隙有效调节, 通过控制沉积的角度和方向在衬底表面制备出多样的金属纳米结构阵列, 如图 8 所示。当溅射的角度和方向不同时, 溅射出的靶材通过胶体球模板的阴影形成可控的金属纳米结构, 如图 8(a)和图 8(b)所示。当溅射出的靶材在同一角度、三个方向(他们之间相差 120°)下沉积金属纳米薄膜, 由于胶体球模板的阴影的作用将在衬底上将形成三支岔阵列, 如图 8(c)所示。另外, 在相同的角度下, 分别四个和六个方向上沉积靶材时, 将会形成四边形和螺旋结构阵列结构, 如图 8(d)和图 8(e)所示[19]。

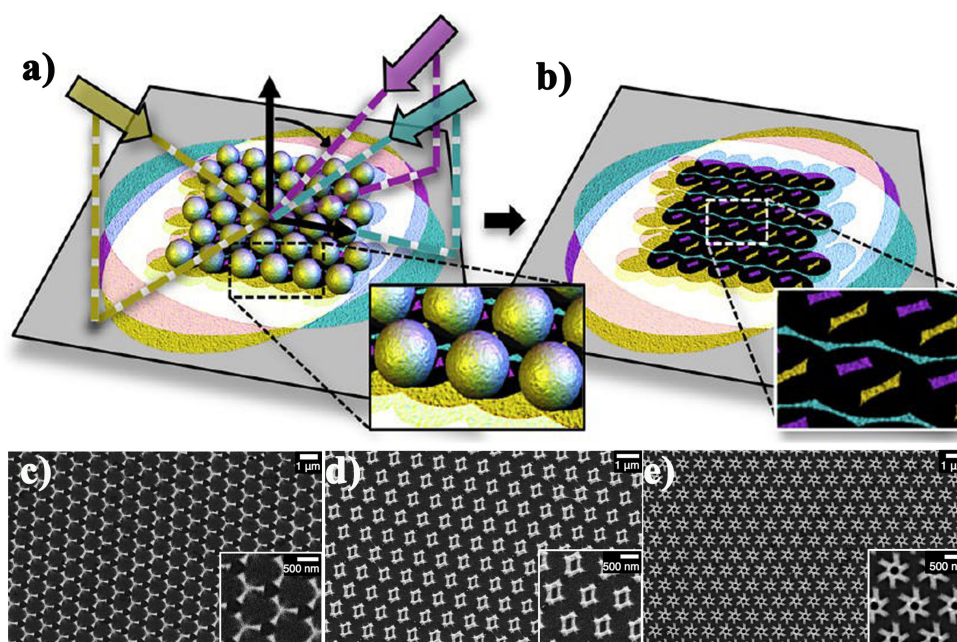


Figure 8. Diversified metal nanostructures fabricated by colloidal sphere template combined with oxygen plasma etching and angle-resolved deposition. (a) and (b) definition of free parameters relative to the crystal axis. an example composed of three different types of features: (1) an interconnected line, (2) an asymmetric bar, and (3) a symmetric bar. (c), (d) and (e) SEM Patterns composed of two to three (a), four (b), and five to six (c) different angles of deposition respectively [19]

图 8. 胶体球模板结合氧等离子刻蚀和角度分辨沉积技术制备出的多样金属纳米结构。(a)和(b)为制备多样金属结构的示意图。在相同角度、三个方向下产生的三支岔阵列。(c) (d)和(e)在相同角度、四个和六个方向下产生的四边形和螺旋阵列结构[19]

4. 总结

在这篇综述中, 我们总结大面积胶体球阵列结构的制备最新进展以及以其为模板制备出多样的金属纳米阵列结构。大面积、高品质的胶体球阵列结构通过对流自组装及界面组装法取得很大的进步, 其中, 微推进喷射系统控制下的界面自组装可高效的制备出超大面积($>1 \text{ m}^2$)胶体球阵列结构。纳米球刻蚀技术(或者叫胶体球刻蚀技术)作为一种简单、易行且低成本的技术, 以胶体球为模板结合刻蚀和沉积技术制备多种新型的反蛋白质金属结构, 如纳米锥、纳米柱、米金字塔、纳米铅笔、米半环及纳米网络阵列结构。这些新型的金属纳米结构在化学生物传感、太阳能电池, 超疏水材料, 手性自旋材料等方面有重要的潜在应用。

基金项目

该论文由天津市大学生创新训练项目(201810792038 & 201810792051)资助。

参考文献

- [1] Qi, J., Xiang, Y., Yan, W., Li, M., Yang, L., Chen, Z., Cai, W., Chen, J., Li, Y., Wu, Q., Yu, X., Sun, Q. and Xu, J. (2016) Excitation of the Tunable Longitudinal Higher-Order Multipole SPR Modes by Strong Coupling in Large-Area Metal Sub-10 nm-Gap Array Structures and Its Application. *Journal of Physical Chemistry C*, **120**, 24932-24940. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05108>
- [2] Zhang, G., Wang, D. and Moehwald, H. (2007) Ordered Binary Arrays of Au Nanoparticles Derived from Colloidal Lithography. *Nano Letters*, **7**, 127-132. <https://doi.org/10.1021/nl062284c>
- [3] Haynes, C.L. and Van Duyne, R.P. (2001) Nanosphere Lithography: A Versatile Nanofabrication Tool for Studies of Size-Dependent Nanoparticle Optics. *The Journal of Physical Chemistry B*, **105**, 5599-5611. <https://doi.org/10.1021/jp010657m>
- [4] Yang, S., Lapsley, M.I., Cao, B., Zhao, C., Zhao, Y., Hao, Q., Kiraly, B., Scott, J., Li, W., Wang, L., Lei, Y. and Huang, T.J. (2013) Large-Scale Fabrication of Three-Dimensional Surface Patterns Using Template-Defined Electrochemical Deposition. *Advanced Functional Materials*, **23**, 720-730. <https://doi.org/10.1002/adfm.201201466>
- [5] Zhang, X.M., Li, Z.B., Ye, S.S., Wu, S., Zhang, J.H., Cui, L.Y., Li, A.R., Wang, T.Q., Li, S.Z. and Yang, B. (2012) Elevated Ag Nanohole Arrays for High Performance Plasmonic Sensors Based on Extraordinary Optical Transmission. *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 8903-8910.
- [6] Li, Y., Huang, X.J., Heo, S.H., Li, C.C., Choi, Y.K., Cai, W.P. and Cho, S.O. (2007) Superhydrophobic Bionic Surfaces with Hierarchical Microsphere/SWCNT Composite Arrays. *Langmuir*, **23**, 2169-2174. <https://doi.org/10.1021/la0620758>
- [7] Yu, H., Liu, J., Fan, X., Yan, W., Han, L., Han, J., Zhang, X., Hong, T. and Liu, Z. (2016) Bionic Micro-Nano-Bump-Structures with a Good Self-Cleaning Property: The Growth of ZnO Nanoarrays Modified by Polystyrene Spheres. *Materials Chemistry and Physics*, **170**, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.12.018>
- [8] Chen, X., Chen, X. H., Xu, X., Yang, Z., Liu, Z., Zhang, L. J., Xu, X. J., Chen, Y. and Huang, S.M. (2014) Sulfur-Doped Porous Reduced Graphene Oxide Hollow Nanosphere Frameworks as Metal-Free Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction and as Supercapacitor Electrode Materials. *Nanoscale*, **6**, 13740-13747. <https://doi.org/10.1039/C4NR04783D>
- [9] Jensen, T.R., Malinsky, M.D., Haynes, C.L. and Van Duyne, R.P. (2000) Nanosphere Lithography: Tunable Localized Surface Plasmon Resonance Spectra of Silver Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry B*, **104**, 10549-10556. <https://doi.org/10.1021/jp002435e>
- [10] Dai, Z., Li, Y., Duan, G., Jia, L. and Cai, W. (2012) Phase Diagram, Design of Monolayer Binary Colloidal Crystals, and Their Fabrication Based on Ethanol-Assisted Self-Assembly at the Air/Water Interface. *ACS Nano*, **6**, 6706-6716. <https://doi.org/10.1021/nn3013178>
- [11] Denis, F.A., Hanarp, P., Sutherland, D.S. and Dufrene, Y.F. (2002) Fabrication of Nanostructured Polymer Surfaces Using Colloidal Lithography and Spin-Coating. *Nano Letters*, **2**, 1419-1425. <https://doi.org/10.1021/nl025750g>
- [12] Gao, P.Q., He, J., Zhou, S.Q., Yang, X., Li, S.Z., Sheng, J., Wang, D., Yu, T.B., Ye, J.C. and Cui, Y. (2015) Large-Area Nanosphere Self-Assembly by a Micro-Propulsive Injection Method for High Throughput Periodic Surface Nanotexturing. *Nano Letters*, **15**, 4591-4598. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01202>
- [13] Oh, J.R., Moon, J.H., Yoon, S., Park, C.R. and Do, Y.R. (2011) Fabrication of Wafer-Scale Polystyrene Photonic Crystal Multilayers via the Layer-by-Layer Scooping Transfer Technique. *Journal of Materials Chemistry*, **21**, 14167-14172. <https://doi.org/10.1039/c1jm11122a>
- [14] Reddy, M.H.V., Al-Shammari, R.M., Al-Attar, N., Kennedy, E., Rogers, L., Lopez, S., Senge, M.O., Keyes, T.E. and Rice, J.H. (2014) Micro- or Nanorod and Nanosphere Structures Derived from a Series of Phenyl-Porphyrins. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **16**, 4386-4393. <https://doi.org/10.1039/C3CP54936D>
- [15] Toma, M., Loget, G. and Corn, R.M. (2013) Fabrication of Broadband Antireflective Plasmonic Gold Nanocone Arrays on Flexible Polymer Films. *Nano Letters*, **13**, 6164-6169. <https://doi.org/10.1021/nl403496a>
- [16] Liu, Y., Lee, Y.H., Zhang, Q., Cui, Y. and Ling, X.Y. (2016) Plasmonic Nanopillar Arrays Encoded with Multiplex Molecular Information for Anti-Counterfeiting Applications. *Journal of Materials Chemistry C*, **4**, 4312-4319. <https://doi.org/10.1039/C6TC00682E>
- [17] Wang, D.Y. and Moehwald, H. (2004) Rapid Fabrication of Binary Colloidal Crystals by Stepwise Spin-Coating. *Advanced Materials*, **16**, 244-247. <https://doi.org/10.1002/adma.200305565>

- [18] Wang, W.H., Dong, J.Y., Ye, X.Z., Li, Y., Ma, Y.R. and Qi, L.M. (2016) Heterostructured TiO₂ Nanorod@Nanobowl Arrays for Efficient Photoelectrochemical Water Splitting. *Small*, **12**, 1469-1478. <https://doi.org/10.1002/sml.201503553>
- [19] Nemiroski, A., Gonidec, M., Fox, J.M., Jean-Remy, P., Turnage, E. and Whitesides, G.M. (2014) Engineering Shadows to Fabricate Optical Metasurfaces. *ACS Nano*, **8**, 11061-11070. <https://doi.org/10.1021/nn504214b>
- [20] Zhang, J.-T., Wang, L., Lamont, D.N., Velankar, S.S. and Asher, S.A. (2012) Fabrication of Large-Area Two-Dimensional Colloidal Crystals. *Angewandte Chemie-International Edition*, **51**, 6117-6120. <https://doi.org/10.1002/anie.201105439>
- [21] Reynaert, S., Moldenaers, P. and Vermant, J. (2006) Control over Colloidal Aggregation in Monolayers of Latex Particles at the Oil-Water Interface. *Langmuir*, **22**, 4936-4945. <https://doi.org/10.1021/la060052n>
- [22] Sun, J., Tang, C.J., Zhan, P., Han, Z.L., Cao, Z.S. and Wang, Z.L. (2010) Fabrication of Centimeter-Sized Single-Domain Two-Dimensional Colloidal Crystals in a Wedge-Shaped Cell under Capillary Forces. *Langmuir*, **26**, 7859-7864. <https://doi.org/10.1021/la9047165>
- [23] Ye, R., Ye, Y.-H., Zhou, Z. and Xu, H. (2013) Gravity-Assisted Convective Assembly of Centimeter-Sized Uniform Two-Dimensional Colloidal Crystals. *Langmuir*, **29**, 1796-1801. <https://doi.org/10.1021/la3040227>
- [24] Zheng, H. and Wu, K. (2013) Enhanced Light Emission of InGaN Light-Emitting-Diodes by Nanosphere Lithography Generated Photonic Crystals with Different Geometries. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, **2**, 241-244. <https://doi.org/10.1149/2.021311jss>
- [25] Haynes, C.L. and Van Duyne, R.P. (2001) Nanosphere Lithography: A Versatile Nanofabrication Tool for Studies of Size-Dependent Nanoparticle Optics. *Journal of Physical Chemistry B*, **105**, 5599-5611. <https://doi.org/10.1021/jp010657m>
- [26] Yan, Z.D., Chen, X., Du, W., Chen, Z., Zhan, P., Wang, H.T. and Wang, Z.L. (2014) Near-Field Plasmonic Coupling for Enhanced Nonlinear Absorption by Femtosecond Pulses in Bowtie Nanoantenna Arrays. *Applied Physics A*, **117**, 1841-1848.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org