第 39 卷第 6 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol.39,No.6
2018 年 12 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Dec. 2018

文章编号:1008-1542(2018)06-0487-07　　doi:10.7535/hbkd.2018yx06002

尺寸形貌对硅纳米锥阵列结构反射特性的影响

黎相孟[1],祝锡晶[1],魏慧芬[2],崔学良[1],李建素[1]

(1.中北大学先进制造技术山西省重点实验室,山西太原　030051;2.中北大学仪器与电子学院,山西太原　030051)

摘　要:为了探讨不同尺度和形貌的硅纳米锥阵列结构表面的光学特性,采用基于纳米粒子自组装薄膜掩蔽的亚微米干法刻蚀工艺,在硅基材表面制备了纳米锥阵列结构,并对纳米锥阵列结构进行了形貌表征及光学测试。结果表明,采用 SF_6 和 C_4F_8 混合气体,其体积流量分别为 12 sccm 和 27 sccm,功率 750 W,偏压 25 V 时,可以获得光学减反射性能优异的纳米锥阵列结构。通过调节刻蚀时长获得形貌相似而尺寸不同的硅纳米锥阵列结构。200 nm 和 400 nm 周期硅纳米锥阵列结构表面具有 2%～3%的反射率,而 800 nm 周期硅纳米锥阵列结构表面则接近于硅基材背面的反射率并高于 10%,说明亚波长结构的减反射特性更加显著。从实验上揭示了尺寸形貌对硅纳米锥阵列结构反射特性的影响规律,为进一步研究光学器件方面的应用提供了参考。

关键词:等离子体动力学;干法刻蚀;硅纳米锥阵列;亚波长结构;减反射

中图分类号:TB133　　**文献标志码:**A

Effect of size and shape on reflective properties of silicon nanocone arrays

LI Xiangmeng[1],ZHU Xijing[1],WEI Huifen[2],CUI Xueliang[1],LI Jiansu[1]

(1. Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China; 2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: In order to investigate the optical properties of silicon nanocone arrays with different sizes and shapes, the nanocone arrays are fabricated on silicon substrate by submicron dry etching process masked by self-assembled nano-particles. The morphology and optical properties of the nano-cone arrays are characterized. The results show that the nanocone arrays with excellent optical antireflection performance can be obtained when the plasma flow ratio of SF_6 and C_4F_8 is 12 sccm, 27 sccm, the power is 750 W and the bias voltage is 25 V. By adjusting the etching time, silicon nanocone structures with similar morphology and different sizes can be obtained. The reflectivity of 200 nm and 400 nm periodic silicon nanocone arrays is 2%～3%, while that of 800 nm periodic silicon nanocone arrays is close to and 10% higher than the reflectivity of silicon substrate, which

收稿日期:2018-09-01;修回日期:2018-09-28;责任编辑:陈书欣

基金项目:国家自然科学基金(51705479);山西省青年科技研究基金(201701D221128, 201701D221167);中北大学校科学基金(2017005)

第一作者简介:黎相孟(1985—),男,广西北海人,讲师,博士,主要从事微纳制造及应用方面的研究。

E-mail:xmli123@nuc.edu.cn

黎相孟,祝锡晶,魏慧芬,等.尺寸形貌对硅纳米锥阵列结构反射特性的影响[J].河北科技大学学报,2018,39(6):487-493.

LI Xiangmeng, ZHU Xijing, WEI Huifen, et al. Effect of size and shape on reflective properties of silicon nanocone arrays[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2018,39(6):487-493.

indicates that the anti-reflectivity of sub-wavelength structure is more remarkable. The result reveals experimentally the dimensional and morphological effect of silicon nanocone array structures on the antireflective properties, which may shed some important insights on further investigation or application in optical devices.

Keywords: plasma dynamics; dry etching; silicon nanocone array; subwavelength structure; antireflection

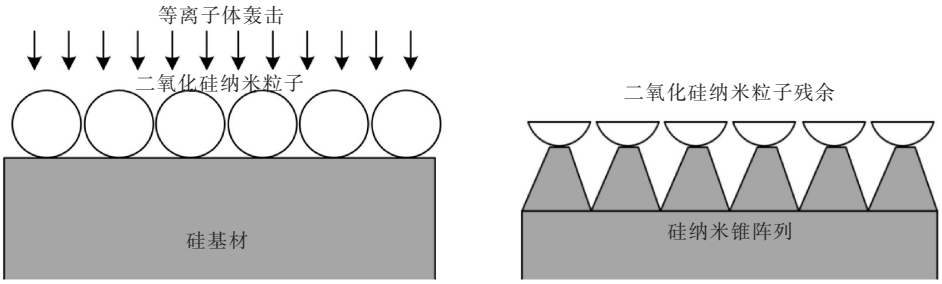
纳米结构在诸如表面工程、光学器件、光电器件、新能源及仿生减阻等领域有广泛的应用[1-6]。如何在基材表面构筑有用的大面积纳米结构,或将纳米结构转移到其他功能材料,实现其特性及应用是工程师和科学家们探讨的课题。相对于自顶向下的纳米结构设计,基于自底向上的纳米结构设计与构筑是相对低成本的,而且能够实现高效率和高产出率[7-8]。大量事实证明,将自底向上的途径和自顶向下的途径相结合,将较为有效地实现大面积功能化纳米结构。类似于大规模集成电路制造的传统光刻工艺,虽然能够获得精确的大面积微尺度结构,但如果要制备亚微米尺度的结构,则需要非常昂贵的光刻设备。通常,对于一些非集成电路制造的应用场合,不需要过于精确排布的亚微米结构或纳米结构,比如太阳能电池和发光二极管(LED)等光电器件的进出光界面[9-10]。为了追求更低成本的纳米制造,基于纳米粒子自组装薄膜为掩蔽的刻蚀转移结构制造方法将更加有前途而得到科学家和工程师们的青睐。吉林大学杨柏教授课题组长期从事聚合物纳米粒子薄膜的规则自组装排列,并基于纳米粒子自组装的大面积图形化工艺,实现了诸多材料的纳米结构与应用[11-12]。佛罗里达大学姜鹏教授课题组报道了采用改进的旋涂工艺和LB膜提拉法制备大面积的纳米粒子自组装薄膜,转移到多晶硅基材表面,实现了LED光电转换效率的提高[13]。LUO等[14]采用纳米粒子薄膜自组装与刻蚀玻璃结构提高了有机发光二极管(OLED)的光萃取效率,此外,提出将纳米结构作为模具通过多次压印方式转移到钙钛矿功能层上,较大程度地提高了钙钛矿太阳能电池的光电转换效率[15]。纳米粒子薄膜及其转移结构功能的综述报道不一而足,详见文献[16—17]。

众所周知,纳米粒子自组装图形结构仅仅是基材表面的一层薄膜结构,这层结构与基材之间的作用力主要是范德华力,无法保证实际应用中所需要的机械强度[18]。采用刻蚀工艺可以实现从纳米粒子向纳米锥阵列结构进行转移制造。在众多的转移制造工艺中,刻蚀工艺是基于纳米粒子掩蔽保护而去除材料,将掩蔽结构图形复制到基材上的工艺[19-21]。通常,刻蚀工艺包括湿法腐蚀和干法刻蚀两种类型。一方面,湿法腐蚀主要是通过液态的化学反应将基材溶解的过程,因此纳米粒子容易在溶液反应过程中受到生成气体的作用力而漂浮起来使其失去对基材的掩蔽作用。另一方面,硅的湿法腐蚀溶液包括KOH溶液和HNO_3+HF混合溶液,其中KOH溶液表现为各向异性的腐蚀,对于<100>晶向的硅片,通常形成倒金字塔形的刻蚀结构,HNO_3+HF混合溶液则主要表现为各向同性的腐蚀,这两者均难以获得深宽比较大的柱状结构或者侧壁陡峭的锥状结构[21]。因此,为了获得锥状结构和侧壁光滑陡峭的锥状结构,采用感应耦合等离子体和反应离子刻蚀(ICP/RIE)工艺,在高真空环境下产生高压电离的低温等离子体,对材料表面进行物理轰击并伴随有化学反应,利用纳米粒子的掩蔽保护去除不被纳米粒子掩蔽部分的基底材料。

为了探讨不同纳米粒子尺寸和不同刻蚀形貌的硅纳米锥阵列结构对光学反射特性的影响,以尺度在200~800 nm纳米粒子自组装薄膜为掩蔽的硅基材的亚微米干法刻蚀工艺,制备硅纳米锥阵列结构,揭示不同织构特征形貌对表面光学特性的影响规律,为进一步优化应用提供实验依据。

1 实 验

首先,将硅基材置于Piraha溶液(H_2SO_4∶H_2O_2=3∶1,体积分数)95 ℃煮沸30 min,并用去离子水冲洗干净,氮气吹干,采用蒸发诱导自组装方法在硅基材表面制备了较大面积的单层二氧化硅纳米粒子薄膜结构[13]。然后,基于该层纳米粒子薄膜的掩蔽,采用干法刻蚀工艺制备硅纳米织构。现有的硅干法刻蚀工艺中主要以SF_6,C_4F_8为工作气体。在千级超净间实验室中进行干法刻蚀工艺研究,所采用的设备是英国牛津仪器公司生产的PlasmaLab System100。采用亚微米刻蚀工艺制备硅纳米锥阵列结构机理如图1所示。



a）刻蚀开始　　b）刻蚀结束

图 1　硅纳米锥阵列结构亚微米刻蚀工艺示意图

Fig.1　Schematic illustration of submicron etching processing for fabricating silicon nanocone array structures

为了获得深宽比特征尺寸在亚微米级别的硅纳米锥阵列结构，采用 SF_6 和 C_4F_8 混合气体，按一定的气体流量速率比，同时形成等离子体对基材表面进行刻蚀。其中，SF_6 气体用于刻蚀，C_4F_8 气体用于钝化，两种气体交替或同时进行作用，一边刻蚀，一边钝化，在二氧化硅纳米粒子薄膜的掩蔽保护作用下逐渐形成倾斜的锥状结构。表 1 给出了主要刻蚀参数。

表 1　硅纳米锥阵列结构刻蚀工艺参数

Tab.1　Processing parameters for etching silicon nanocone array structures

刻蚀参数	设定值
SF_6 流量/sccm	12
C_4F_8 流量/sccm	27
RF 功率/W	750
射频偏压/V	25
腔室压力/mTorr	10
基片温度/℃	25

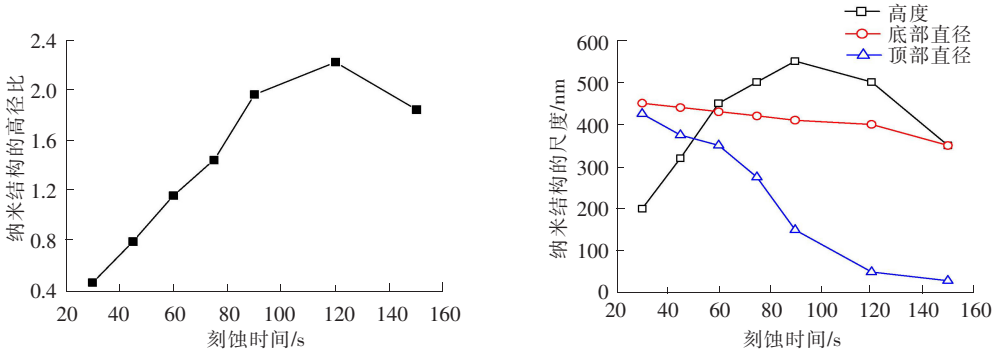
注：1 sccm＝1 mL/min；10 mTorr＝1.33 Pa。

2　结果与讨论

2.1　刻蚀时长对硅纳米结构形貌的影响

硅材料最终转化为气相产物 SiF_4 气体被排出反应腔室。二氧化硅纳米粒子掩蔽与硅基材之间具有一定的刻蚀选择比。刻蚀选择比的定义是，单位时间内刻蚀硅材料的速率与刻蚀掩蔽层材料的速率之比值。根据经验，采用这种混合方式的刻蚀气体，无法获得较高的刻蚀选择比，只有 2∶1 左右；刻蚀硅的速率约为 400 nm/min，二氧化硅速率约为 200 nm/min。采用混合气体同时作用可以实现对硅材料各向异性的刻蚀，最终获得侧壁为锥状结构的织构表面。不过作为掩蔽层的二氧化硅纳米粒子也几乎被全部刻蚀，若继续刻蚀则会降低已成形的硅纳米锥阵列结构的深宽比。

如图 2 所示为刻蚀时间对硅纳米结构的尺度和形貌的影响。由图 2 可见，刻蚀得到的硅纳米锥阵列结构随着刻蚀时间的变化而获得不同形貌。主要的尺寸参数包括纳米锥阵列结构顶部直径、底部直径及高度。当刻蚀时间小于 30 s 时，刻蚀深度只有 200 nm，获得的硅纳米锥阵列结构的高径比（锥的高度和底圆直径之比）只有 1/2 左右。本文所选择的刻蚀时间为 30～150 s。当刻蚀时间为 30 s 时，大约有 1/3 的二氧化硅粒子掩蔽被刻蚀掉，形成的硅柱子的高度为 200 nm 左右；而当刻蚀时间为 60 s 时，有超过 1/2 的二氧化硅粒



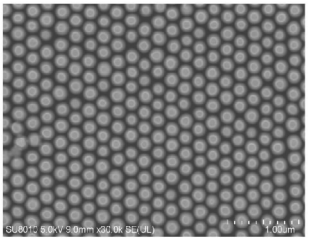
a）高径比随刻蚀时间的变化　　b）尺寸随刻蚀时间的变化

图 2　硅纳米结构随刻蚀时间的变化规律（400 nm 粒径）

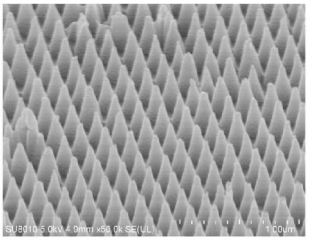
Fig.2　Dimension variation of silicon nanocone array structures with varying etching time (400 nm NPs in diameter)

子掩蔽被刻蚀掉，形成的硅柱子的高度为 450 nm 左右；当刻蚀时间为 90 s 时，几乎所有的二氧化硅粒子掩蔽被刻蚀掉，形成的硅柱子的高度为 550 nm 左右；最后，当刻蚀时间为 120 s 以上时，所有的二氧化硅粒子掩蔽被刻蚀掉，且部分已经形成的硅柱子材料也被刻蚀掉，因而形成的高度反而减少为 500 nm 左右。

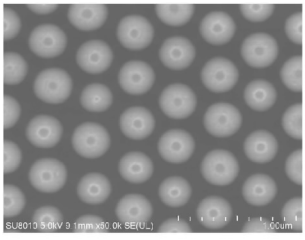
纳米锥阵列结构的形貌主要取决于刻蚀掩蔽的形状与尺寸。因此，采用不同粒径的单层致密排布的纳米粒子薄膜掩蔽进行刻蚀时，将会制备出具有不同尺寸硅纳米锥阵列结构。以 200，400 和 800 nm 粒径的纳米粒子薄膜为掩蔽，采用亚微米刻蚀工艺进行刻蚀，制备了如图 3 所示的几种不同尺寸和形貌的硅纳米锥阵列结构。在适当的刻蚀条件下，不同粒径的纳米粒子掩蔽均可以获得锥状硅纳米结构。不过，在较短的刻蚀时间条件下将会获得如图 4 a)所示的纳米凸台阵列结构及如图 4 b)所示的纳米石榴状阵列结构。



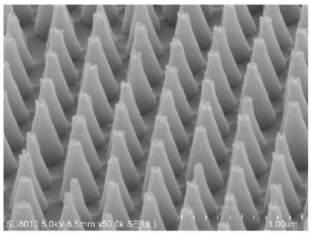
a) 200 nm 俯视图



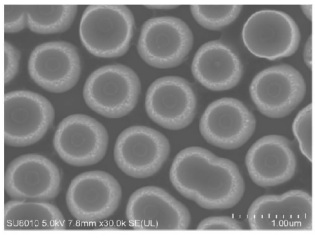
b) 200 nm 侧视图



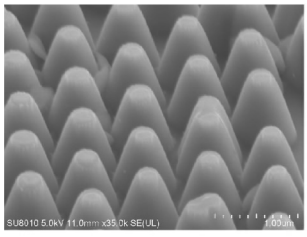
c) 400 nm 俯视图



d) 400 nm 侧视图



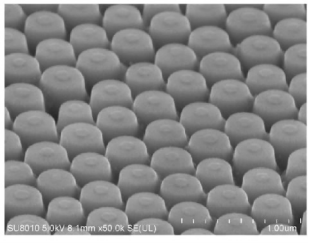
e) 800 nm 俯视图



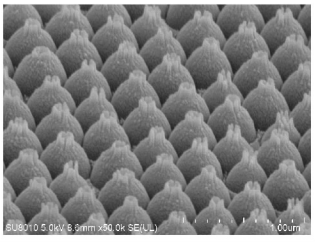
f) 800 nm 侧视图

图 3 不同直径的二氧化硅纳米粒子掩蔽的刻蚀结构 SEM 图

Fig.3 SEM images of structures resulted from silica NPs with varying diameters



a) 纳米凸台阵列结构



b) 纳米石榴状阵列结构

图 4 较短刻蚀时间条件下制备的纳米结构

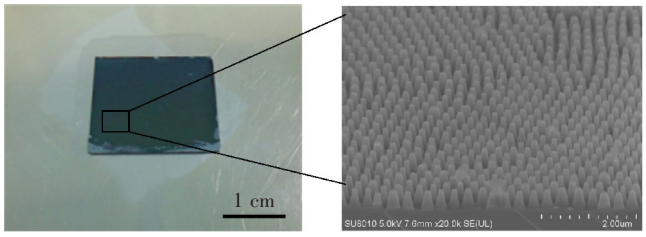
Fig.4 Nanostructures resulted from shorter etching time

2.2 硅纳米锥阵列结构形貌与尺寸对光学特性的影响

单层致密的纳米粒子薄膜具有准周期布拉格光栅效应，通过硅基材表面的纳米粒子薄膜表面所散射出的彩色光可以判断。对于同一种粒子直径，改变刻蚀时间可以获得不同尺寸的纳米锥阵列结构。比如，以 250 nm 粒径的二氧化硅纳米粒子薄膜为掩蔽所制备的硅纳米锥阵列结构，时间为 20～70 s。采用 SEM 观

察制备的结构，可以发现，当刻蚀时间为 70 s 时，能够得到期望的硅纳米锥形貌，且具有较高的比表面积。随着刻蚀时间的增加，刻蚀深度在增大，获得的纳米锥形貌的高径比越大，样片表面呈现的颜色越黑。所形成硅片表面呈现为黑色，即所谓的“黑硅”，而且黑色的程度随着结构的高径比的增大而加重。“黑硅”之所以黑，是因为可见光与硅纳米锥阵列结构发生相互作用，导致可见光波段的光线大部分被吸收，而反射出很少的光，也就是说这种硅纳米结构表面的抗反射性能好。同时，这种良好的减反射特性将有利于太阳能电池板捕获和吸收太阳光的能力，进而有效地提高电池工作效率。

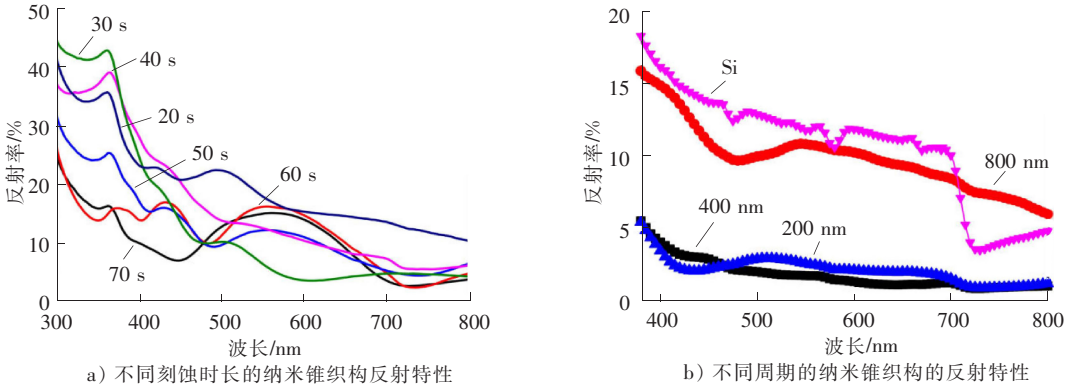
图 5 为刻蚀前后样片的数码照片和 SEM 图。由图可见，刻蚀前的 250 nm 纳米粒子薄膜在白光下基本表现为透明，而刻蚀过的样片则表现为深灰色甚至黑色。当采用紫外可见分光光度计测试样片表面的反射率时，结果表明，硅纳米锥阵列结构对白光具有很低的反射率。图 6 所示为 250 nm 周期的纳米锥阵列结构随刻蚀时长的反射率变化。由图 6 a)可见，对于刻蚀时长为 20～70 s 的 250 nm 周期纳米锥阵列结构，其表面的反射率在 380～780 nm 可见光波段内主要处于 5%～20%之间；而其反射率在300～380 nm紫外波段有较大的升高，原因可能是硅纳米锥阵列结构对紫外光的吸收在该波段有所增强。相比而言，笔者前期研究结果表明，表面没有结构的裸硅片反射率在可见光区域为 40%以上，且在紫外波段反射率高达 60%以上[22]。图 6 b)所示对比 200～800 nm 粒径纳米粒子的掩蔽刻蚀织构表面的反射率，可以看出 200 和 400 nm 的纳米织构表面具有低于 2.5%的反射率，而 800 nm 的纳米织构表面则呈现大于 10%的反射率，并接近于未抛光的硅基材背面(表面为微米尺寸的随机粗糙形貌)的反射率。由此可见，对于微米尺度的硅材料结构而言，其规则结构的光学反射特性与不规则粗糙结构的光学反射特性相近。



a) 硅纳米结构表面的数码照片　　b) 硅纳米结构的 SEM 图

图 5　以 250 nm 粒子为掩蔽刻蚀制备的硅纳米结构表面的宏观和微观形貌

Fig.5　Morphologies of silicon nanostructure surface etched from 250 nm diameter silica NPs film



a) 不同刻蚀时长的纳米锥织构反射特性　　b) 不同周期的纳米锥织构的反射特性

图 6　不同尺寸的二氧化硅纳米粒子掩蔽刻蚀的硅纳米锥阵列结构的反射光谱

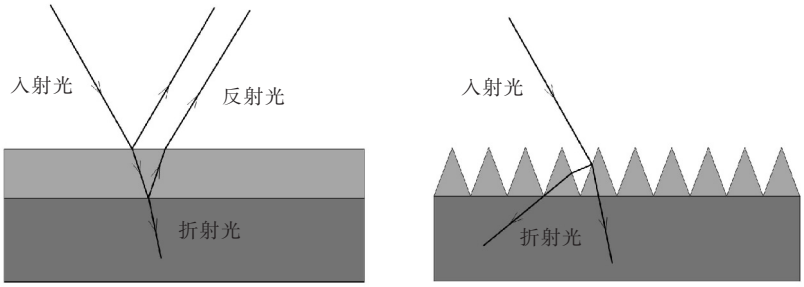
Fig.6　Reflectance spectra of silicon nanostructures resulted from silica NPs in different diameters

硅纳米锥阵列结构表面具有较低的反射率的主要原因是硅纳米锥阵列结构在一定的周期和形貌的情况下表面形成折射率梯度，促进了结构对光线在整个可见光区域的吸收。图 7 给出了光滑界面和纳米锥阵列结构界面的反射特性对比示意图。对于图 7 a)所示的光滑界面，根据菲涅尔反射定律，反射率表示为[23]

$$R=(n_1-n_2)^2/(n_1+n_2)^2, \tag{1}$$

式中：R 表示界面折射率；n_1 和 n_2 分别表示光线入射表面两界面介质的折射率。

式(1)表明，在光滑表面不可避免地有较高的反射率，尤其是当界面上空气与介质的折射率差异较大时。对于图 7 b)所示的纳米锥阵列结构界面，当光线入射到亚波长特征尺寸的纳米锥阵列表面时，由于渐变的折射率，导致从空气到硅基材的传播过程中存在折射率匹配的过程，一部分光会沿着锥状表面被入射到基材中，另外一部分光在纳米锥阵列中发生随机的散射和能量耗散，导致光线最终无法入射，因而达到降低反射



a) 光滑界面菲涅尔反射特性　　b) 纳米锥阵列结构界面减反射特性

图7　光滑界面与纳米锥阵列结构界面的反射特性对比示意图

Fig.7　Schematic illustration of reflectance on smooth and nanocone structured interfaces

光的缘故。然而,当结构尺寸接近于微米尺度时,由于其结构周期大于波长,将降低界面折射率匹配效果,因此其反射率将接近于微米尺度的粗糙表面。

3　结　语

采用亚微米干法刻蚀工艺在硅基材表面制备了硅纳米锥阵列结构,研究了不同刻蚀参数及不同尺寸纳米粒子尺寸掩蔽层对硅纳米结构形貌及其光学反射特性的影响。结果表明,随着刻蚀时间的增加,硅纳米结构的高径比随之增大,当随着纳米粒子薄膜刻蚀掩蔽层逐渐被消耗,其高径比将有所降低;以不同的粒子直径的纳米粒子薄膜为掩蔽,所制备的纳米结构尺寸不同而形貌几乎为纳米锥形状。通过对比反射光谱发现,刻蚀参数的较小差异将引起较大的变化。对于250 nm纳米粒子直径为掩蔽的纳米锥阵列结构,刻蚀时长为70 s时所获得的反射率就全波段而言较低;200和400 nm周期硅纳米锥阵列结构的反射率为2%～3%左右;而800 nm周期硅纳米锥阵列结构的反射率为10%左右,与硅基材的背面反射率相近,表明结构较大的亚微米阵列光学特性与微米不规则粗糙度表面相似。本研究主要从实验角度分析纳米锥阵列结构的减反射特性,但对于观察和实验结果的解释仍不够深入。下一步研究工作将从影响规律和机理方面着手,采用光学建模和仿真等手段或许能够给出更为深入详尽的解释。

参考文献/References:

[1] SHAO Jinyou, DING Yucheng, WANG Wenjun, et al. Generation of fully-covering hierarchical micro-/nano- structures by nanoimprinting and modified laser swelling[J]. Small, 2014, 10(13): 2595-2601.

[2] KWON Y W, PARK J, KIM T, et al. Flexible near-field nanopatterning with ultrathin, conformal phase masks on nonplanar substrates for biomimetic hierarchical photonic structures[J]. ACS Nano, 2016, 10(4): 4609-4617.

[3] PENG Linfa, ZHANG Chengpeng, WU Hao, et al. Continuous fabrication of multiscale compound eyes arrays with antireflection and hydrophobic properties[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2016, 15(6): 971-976.

[4] 杨成娟,李媛,梅雪松,等. 纳秒激光制备钛表面纹理结构及其润湿性研究[J]. 河北科技大学学报,2016,37(4):315-321.
YANG Chengjuan, LI Yuan, MEI Xuesong, et al. Study on the fabrication of titanium surface texture by nanosecond laser and its wettability[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(4):315-321.

[5] 王立新. 东亚飞蝗体表润湿性测试及疏水机理分析[J]. 河北科技大学学报,2017,38(5):411-417.
WANG Lixin. Wettability measurement and hydrophobicity mechanism analysis of body surface in locust Locusta migratoria manilensis [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(5):411-417.

[6] 王政,李田,李明,等. 仿生表面微结构减阻优化及机理研究综述[J]. 河北科技大学学报,2017,38(4):325-334.
WANG Zheng, LI Tian, LI Ming, et al. Review of mechanical research and aerodynamic drag reduction of bionic surface micro-structures [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(4):325-334.

[7] GAO Pingqi, HE Jian, ZHOU Suqiong, et al. Large-area nanosphere self-assembly by a micro-propulsive injection method for high throughput periodic surface nanotexturing[J]. Nano Letters, 2015, 15(7): 4591-4598.

[8] WANG Chunhui, SHAO Jinyou, TIAN Hongmiao, et al. Step-controllable electric-field-assisted nanoimprint lithography for uneven large area substrates[J]. ACS Nano, 2016, 10(4): 4354-4363.

[9] 乔惠玲. 基于表面微纳结构的单晶硅太阳能电池减反增效性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2015.
QIAO Huiling. Study on the Antireflecton Performance of Moncrystalline Silicon Solar Cells based on Surface Micro and Nano Structure

[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.

[10] 皇甫慧超. 基于倾斜和复合微纳陷光结构的薄膜太阳能电池性能研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.
HUANGFU Huichao. Study on the Thin Film Solar Cells Performance based on the Inclined and Combined Micro and Nano Light Trapping Structures[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.

[11] LI Yunfeng, ZHANG Junhu, ZHU Shoujun, et al. Biomimetic surfaces for high-performance optics[J]. Advanced Materials, 2009, 21(46): 4731-4734.

[12] 张俊虎，杨柏. 基于自组装胶体晶体构筑有序微结构[J]. 科学通报，2009，54(6)：717-728.
ZHANG Junhu, YANG Bai. Fabrication of ordered microstructures based on self-assembled colloidal crystals (in Chinese)[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 717-728.

[13] PHILLIPS B M, JIANG Peng, JIANG Bin. Biomimetic broadband antireflection gratings on solar-grade multicrystalline silicon wafers[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(19): 191103.

[14] LUO Yu, WANG Chunhui, WANG Li, et al. Flexible organic light-emitting diodes with enhanced light out-coupling efficiency fabricated on a double-sided nanotextured substrate[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(13): 10213-10219.

[15] LUO Yu, LIU Shuyi, BARANGE N, et al. Perovskite solar cells on corrugated substrates with enhanced efficiency[J]. Small, 2016, 12(46): 6346-6352.

[16] LOTITO V, ZAMBELLI T. Approaches to self-assembly of colloidal monolayers: A guide for nanotechnologists[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 246: 217-274.

[17] YANG Y J, KIM M H, PARK O O. Hierarchical honeycomb-patterned polydimethylsiloxane films with tunable nanostructures[J]. Microelectronic Engineering, 2018, 195: 114-120.

[18] 余海湖，伍宏标，李小甫，等. 二氧化硅纳米粒子薄膜的制备及光学性能[J].物理化学学报，2001，17(12)：1057-1061.
YU Haihu, WU Hongbiao, LI Xiaofu, et al. Self-assembly and optical properties of silica nanoparticulate thin films[J]. Acta Physicochimica Sinica, 2001, 17(12): 1057-1061.

[19] 姚明秋，唐彬，苏伟. 单晶硅各向异性湿法刻蚀的形貌控制[J]. 光学精密工程，2016，24(2)：350-357.
YAO Mingqiu, TANG Bin, SU Wei. Morphologic control of wet anisotropic silicon etching[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 350-357.

[20] 颜改革，韩敬宁，殷志富，等. 硅基深宽比结构与 SiO_2 薄膜的干法刻蚀方法研究[J]. 仪表技术与传感器，2015(11)：1-3.
YAN Gaige, HAN Jingning, YIN Zhifu, et al. Dry etching technique study during etching of high-aspect-ratio silicon structure and SiO_2 film[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(11): 1-3.

[21] 张昭，杨兵，陆敏，等. 二氧化硅干法刻蚀倾角控制的工艺研究[J]. 电子世界，2013(24)：239-240.
ZHANG Zhao, YANG Bing, LU Min, et al. Study on the process of SiO_2 dry etching angle control[J]. Electronics World, 2013(24): 239-240.

[22] LI Xiangmeng, LI Xiangming, SHAO Jinyou, et al. Shape-controllable plano-convex lenses with enhanced transmittance via electrowetting on a nanotextured dielectric[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016(39): 9162-9166.

[23] SUN Chih-Hung, JIANG Peng, JIANG Bin. Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(6): 061112.