



氧等离子体处理对GaAs表面单层自组装SiO₂纳米球薄膜的影响

王智栋, 刘云, 彭新村, 邹继军, 朱志甫, 邓文娟

引用本文:

王智栋, 刘云, 彭新村, 等. 氧等离子体处理对GaAs表面单层自组装SiO₂纳米球薄膜的影响[J]. *发光学报*, 2020, 41(3): 253–258.

WANG Zhi-dong, LIU Yun, PENG Xin-cun, et al. Effect of Oxygen Plasma Treatment on Monolayer Self-assembled SiO₂ Nanosphere Thin Films on GaAs Surface[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(3): 253–258.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204103.0253>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米柱高度对GaN基绿光LED光致发光谱的影响

Effects of The Height of Nanorod Structure on The Photoluminescence Spectra of GaN-based Green LED

发光学报. 2016, 37(8): 967–972 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163708.0967>

Au/Ag纳米颗粒的成像技术与应用

Imaging Techniques and Applications of The Au/Ag Nanoparticles

发光学报. 2013, 34(6): 792–796 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133406.0792>

基于局域表面等离子体共振效应的聚合物波导传感器特性研究

Characteristics of Polymer Waveguide Sensor Based on Local Surface Plasmon Resonance

发光学报. 2016, 37(1): 112–116 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163701.0112>

Ag@Fe₃O₄@C–CdTe@SiO₂磁性荧光复合微球的制备与光学特征

Magnetic and Optical Properties of Ag@Fe₃O₄@C–CdTe@SiO₂ Hybrid Nanoparticles

发光学报. 2017, 38(3): 274–280 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173803.0274>

一种基于布拉格反射波导的表面等离子体激光光源

A Plasmonic Laser Source Based On Bragg Reflection Waveguide

发光学报. 2013, 34(10): 1351–1357 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133410.1351>

文章编号: 1000-7032(2020)03-0253-06

氧等离子体处理对 GaAs 表面单层自组装 SiO₂ 纳米球薄膜的影响

王智栋¹, 刘 云¹, 彭新村^{1,2*}, 邹继军¹, 朱志甫¹, 邓文娟¹

(1. 东华理工大学 江西省新能源工艺及装备工程技术中心, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学 教育部核技术应用工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要: 二维纳米阵列结构因其重要的光学性能被广泛应用于各类光电子器件。本文对自组装单层 SiO₂ 纳米球掩模刻蚀法制备 GaAs 纳米柱二维阵列结构的关键工艺技术进行了研究。采用旋涂法在 GaAs 表面制备自组装单层 SiO₂ 纳米球, 重点研究了 GaAs 表面氧等离子体亲水处理工艺对纳米球排列特性的影响, 获得最佳工艺条件为功率配比 100 W + 80 W, 腔室压力 4 Pa, 氧气流量 20 mL/min, 处理时间 1 200 s, 并最终得到排列紧密的大面积单层纳米球薄膜。以单层纳米球为掩模, 采用感应耦合等离子体刻蚀技术在 GaAs 表面制备了纳米柱阵列并测试了其表面光反射谱。测试结果表明, GaAs 纳米柱阵列在特定波段的反射率降低至 5%, 远低于表面无纳米结构的薄膜材料表面高达 40% 的光反射。分析表明纳米柱可以激发米氏散射共振效应, 从而有效降低反射率并提升光吸收。

关键词: SiO₂ 纳米球; 氧等离子体; ICP 刻蚀

中图分类号: TN204

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20204103.0253

Effect of Oxygen Plasma Treatment on Monolayer Self-assembled SiO₂ Nanosphere Thin Films on GaAs Surface

WANG Zhi-dong¹, LIU Yun¹, PENG Xin-cun^{1,2*}, ZOU Ji-jun¹, ZHU Zhi-fu¹, DENG Wen-juan¹

(1. Engineering Research Center of New Energy Technology of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China University of Technology),

Ministry of Education, Nanchang 330013, China)

* Corresponding Author, E-mail: xcpeng@ecit.cn

Abstract: Two-dimensional nano-array structures have been widely used in many optoelectronic devices due to their excellent optical performances. In this work, nano-pillar arrays were fabricated on GaAs substrate by self-assembled monolayer SiO₂ nanospheres etching. Monolayer SiO₂ nanospheres were self-assembled on GaAs substrate by rotary coating. The order of the nanosphere distribution was improved by improving the oxygen plasma hydrophilic treatment process of GaAs surface, and a large area of tightly arranged monolayer nanosphere was obtained under the power ratio of 100 W + 80 W, the chamber pressure of 4 Pa, the oxygen flow rate of 20 mL/min and the etching time of 1 200 s. Taken this monolayer nanosphere as the etching mask, highly ordered GaAs nano-pillar array was then fabricated by inductively coupled plasma etching. The reflectivity of the GaAs nano-pillar array structure was found to be about 5% in a specific band by spectral analysis, which shows that light absorption can be enhanced effectively and can further match the requirements of actual optoelectronic devices.

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(11875012,61204071); 江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心开放基金(JXNE2018-05)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China(11875012,61204071); Opening Foundation of Engineering Research Center of New Energy Technology of Jiangxi Province(JXNE2018-05)

Key words: SiO₂ nanospheres; oxygen plasma; ICP etch

1 引 言

半导体纳米结构以及其在光电领域的潜在应用已被广泛研究^[1-9]。相对于平面结构而言,表面纳米结构有着良好的光学性能,例如二维周期光陷阱纳米结构就被证明能有效地促进晶体硅薄膜太阳能电池光吸收,从而提高能量转换效率,降低工艺成本^[10-13]。以二维纳米阵列结构的阻挡材料为掩模并结合 ICP 等离子体刻蚀技术是自上而下制备二维半导体纳米柱阵列结构的常用方法,而刻蚀掩模的性能是影响纳米柱形貌、直径、间距和排列方式的主要因素,从而影响其光学性能^[14]。常见的掩模技术如电子束光刻、X 射线光刻、软光刻技术和纳米压印技术^[15-18]等均具有效率低、严重依赖设备、成本高、重复性差等缺点。纳米球自组装技术具有工艺过程简单、成本低的优势,通过合理的优化工艺也可以获得高度有序的纳米阵列掩模,其通常采用 Langmuir-Blodgett (LB) 拉膜技术和旋涂技术来制备。Hsu^[19] 利用 LB 拉膜技术在 GaAs 衬底表面形成大面积排列有序的聚苯乙烯(PS)纳米球薄膜,但该技术也受限于昂贵的 LB 拉膜设备,所以旋涂技术作为低成本的纳米球自组装技术成为了焦点。早期的旋涂技术因其重复性差、薄膜分布不均匀等缺点,仅仅用于部分排列有序的纳米球薄膜制备,如 Sanatinia 等^[7] 利用旋涂技术在 GaAs 衬底表面制备出面积仅有几个平方毫米的单层纳米球薄膜。鉴于此,本文利用氧等离子体对 GaAs 基片表面进行亲水处理,进而利用旋涂法制备大面积分布均匀的纳米球薄膜。

经氧等离子体处理, GaAs 表面获得薄氧化层,形成非桥键亲水基团羟基(OH),羟基易与水分子中的氢结合而形成氢键,从而增加 GaAs 表面的浸润性,使得更多的 SiO₂ 纳米球在衬底表面参与自组装,从而获得大面积分布均匀的纳米球薄膜。本文采用 Stöber 法制备得到直径为 500 nm 的 SiO₂ 纳米球,使用氧等离子体对 GaAs 基片进行亲水化改性,并详细研究了氧等离子体处理对表面单层自组装 SiO₂ 纳米球薄膜的影响,优化氧等离子体处理工艺,进而利用旋涂技术在 GaAs 表面制备出单层大面积均匀有序排列的纳米球薄

膜,以此为刻蚀掩模,通过感应耦合等离子体(ICP)刻蚀制备出大面积周期排列的 GaAs 纳米阵列。并进一步检验 GaAs 表面纳米结构的光学性能,对结构进行了反射光谱测试。测试结果显示,其表面反射率远远低于平面 GaAs 衬底材料,从而验证了纳米阵列结构对 GaAs 的吸光能力具有较强的促进作用。

2 实 验

旋涂法制备 GaAs 纳米阵列工艺流程图如图 1 所示。首先用 Stöber 法制备直径为 500 nm 的 SiO₂ 纳米球,并将经过标准清洗的 GaAs 衬底进行亲水化改性处理;紧接着利用旋涂法将纳米球在 GaAs 衬底上自组装成单层薄膜;最后以该薄膜为掩模层,刻蚀制备出高度有序的 GaAs 表面纳米阵列结构。

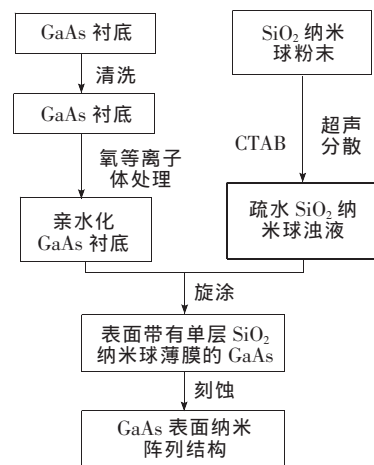


图 1 旋涂法制备 GaAs 纳米阵列工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of GaAs nanoarray prepared by rotary coating

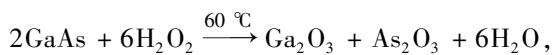
利用改进的 Stöber 法制备 SiO₂ 纳米球,得到 SiO₂ 悬浊液,纳米球直径为 500 nm,采用离心机再将悬浊液离心 70 s(转速为 4 000 r/min),烘干后得到纳米球粉末,将该粉末分散在去离子水中配制成质量分数为 2% 的悬浊液,经过充分超声分散 2 h 后,得到纳米球溶液。GaAs 基片分别经过丙酮、无水乙醇超声清洗后,放入去离子水中浸泡 10 min,经氮气吹干,然后放入 ICP 刻蚀机中进行氧等离子体亲水处理。其中设定 ICP 的源功率为 100 W,偏压功率为 80 W,工作压力为 4 Pa,

通入一定量的 O₂ 处理一段时间,得到表面亲水的 GaAs 衬底。

采用匀胶机将制备好的 SiO₂ 纳米球旋涂至经亲水处理后的 GaAs 基片表面。其具体步骤为:在 GaAs 基片上滴入少量纳米球浊液,设置匀胶机第一段转速为 500 r/min,时间为 10 s;第二段转速为 1 600 r/min,时间为 30 s;待基片自然干燥后得到表面带有单层 SiO₂ 纳米球薄膜的 GaAs 基片。接着利用 ICP 刻蚀来缩减纳米球直径,设置 ICP 源功率为 100 W、偏压功率为 100 W、腔压为 4 Pa 以及刻蚀时间为 260 s,刻蚀气体及其流量分别为 CF₄ 40 mL/min 和 O₂ 10 mL/min;然后以此为阻挡层通过 ICP 刻蚀 GaAs 衬底,设置源功率为 100 W、偏压功率为 360 W、腔压为 0.6 Pa 以及刻蚀时间为 20 s,刻蚀气体及其流量分别为 BCl₃ 6 mL/min 和 N₂ 14 mL/min;再利用 HF 腐蚀纳米线顶部的 SiO₂ 纳米球,即可得到排列高度有序的 GaAs 纳米阵列。

3 结果与分析

对衬底表面进行亲水处理,其本质就是在衬底表面通过氧化剂对其进行处理,形成一层薄的氧化层或使其晶格中携带氧等离子体,当其与水接触时,由于氧离子的存在,使得衬底易与水分子产生氢键故而呈现亲水性。一般采用的是按照 H₂O₂:NH₄OH:H₂O = 1:1:5 的比例配制溶液,并在 60 °C 的温度下浸泡两小时。基于这样的处理方式,我们用其对 GaAs 进行表面亲水处理,实验发现,GaAs 表面的光泽褪去,基片发黑,取出后吹干,发现其表面存在白色物质。分析认为 GaAs 在双氧水中发生了剧烈的氧化反应,而不是仅仅吸附一层单氧层,且白色物质为 GaAs 的氧化物:As₂O₃ 和 Ga₂O₃,其反应方程式如下:



因此,我们采用氧等离子体对 GaAs 进行亲水处理。

在利用旋涂法于 GaAs 片上进行 SiO₂ 纳米球薄膜的自组装过程中,O₂ 流量和等离子体的处理时间是影响纳米球薄膜质量的关键因素。通过对氧气流量和等离子体处理时间进行调节,可以制备出能使大量的纳米球停留在 GaAs 衬底表面并自组装形成排列有序的纳米球薄膜。本次实验针

对 O₂ 流量和处理时间这两个变量分别进行研究。第一组固定处理时间为 1 200 s,设置氧气流量为 4~20 mL/min,步长为 4 mL/min,具体参数参见表 1;第二组固定氧气流量为 20 mL/min,设置处理时间为 240~1 200 s,步长为 240 s,其余条件均保持一致,详细参数见表 2。所制备的样品采用扫描电子显微镜(SEM)(Nova Nano SEM 450)测试其分布情况,采用显微光谱仪(Nova-EX,上海复享光学股份有限公司)测试 GaAs 纳米柱阵列的反射率。

3.1 O₂ 流量对 SiO₂ 纳米球自组装的影响

按照表 1 中的参数进行实验,得到了如图 2 所示的不同 O₂ 流量处理 GaAs 衬底时纳米球薄膜的 SEM 图。图 2(a)为 O₂ 等离子体的流量为 4 mL/min 时旋涂得到的纳米球薄膜,可以看出纳米球不足以完全分布于衬底表面,有较大的空白区域,这是由于 O₂ 流量不足导致等离子体浓度过低,使得衬底只存在局部氧化的区域,且对纳米球的吸附能力弱,导致衬底在高速旋涂过程中,由于离心力的作用,大量的纳米球脱离衬底。图 2(b)为等离子体处理的 O₂ 流量为 8 mL/min 时旋涂得到的纳米球薄膜,可以看出空白区域相较于前者有了明显的缩小,说明不同 O₂ 流量带来的等离子体浓度对纳米球在旋涂过程中的保留作用明显,随着氧等离子体浓度的增加而增加。图 2(c)为等离子体处理的 O₂ 流量为 12 mL/min 时旋涂得到的纳米球薄膜,可以看出纳米球数目几乎完全分布于衬底表面,空白部分面积进一步减小。图 2(d)为等离子体处理的 O₂ 流量为 16 mL/min 时旋涂得到的纳米球薄膜,纳米球呈块状紧密排列于衬底表面,这是因为衬底表面纳米球之间距离较近,使得纳米球之间由于相互作用力而紧密排

表 1 氧等离子体亲水处理参数表(流量)

Tab. 1 Parameters of oxygen plasma hydrophilic treatment (flow)

样品	射频功率/ W	偏压功率/ W	腔压/ Pa	O ₂ 流量/ (mL · min ⁻¹)	处理时间/ s
a	100	80	4	4	1 200
b	100	80	4	8	1 200
c	100	80	4	12	1 200
d	100	80	4	16	1 200
e	100	80	4	20	1 200

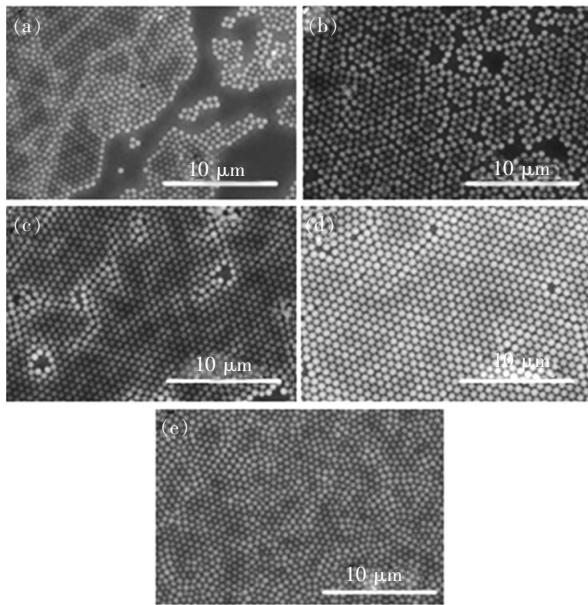


图 2 不同 O_2 流量对纳米球薄膜自组装的影响。(a) 4 mL/min; (b) 8 mL/min; (c) 12 mL/min; (d) 16 mL/min; (e) 20 mL/min。

Fig. 2 Effect of different O_2 flow rates on self-assembly of nanosphere films. (a) 4 mL/min. (b) 8 mL/min. (c) 12 mL/min. (d) 16 mL/min. (e) 20 mL/min.

列在一起。图 2(e) 为等离子体处理的 O_2 流量为 20 mL/min 时旋涂得到的纳米球薄膜, 纳米球已经完全分布于衬底表面, 且排列紧密有序, 呈紧密的六角形排列, 为最佳 O_2 流量参数。

3.2 处理时间对 SiO_2 纳米球自组装的影响

根据表 2 中的参数进行实验, 得到了如图 3 所示的用 O_2 等离子体处理不同时间的 GaAs 衬底旋涂制备的纳米球薄膜的 SEM 图。图 3(a) 表示处理时间为 240 s 时旋涂得到的纳米球薄膜, 可以看到纳米球排列分散, 空隙区域较多、较大。图 3(b) 表示处理时间为 480 s 时旋涂得到的纳米球薄膜, 空白区域减小, 纳米球排列有序, 说明增加处理时间可以增加衬底在旋涂过程中对纳米球的保留能力。图 3(c) 表示处理时间为 720 s 时旋涂得到的纳米球薄膜, 纳米球分布均匀, 但仍有较多的空位, 需要进一步增强衬底对纳米球的吸附力, 使得更多的纳米球不脱离衬底。图 3(d) 表示处理时间为 960 s 时旋涂得到的纳米球薄膜, 纳米球几乎紧密排列于衬底表面。图 3(e) 表示处理时间为 1 200 s 时旋涂得到的纳米球薄膜, 纳米球完全分布于衬底表面, 且高度有序, 呈紧密的六角形排列, 为最佳

表 2 氧等离子体亲水处理参数表(时间)

Tab. 2 Parameters of hydrophilic treatment of oxygen plasma (time)

样品	射频功率/ W	偏压功率/ W	腔压/ Pa	O_2 流量/ ($mL \cdot min^{-1}$)	处理时间/ s
f	100	80	4	20	240
g	100	80	4	20	480
h	100	80	4	20	720
i	100	80	4	20	960
j	100	80	4	20	1 200

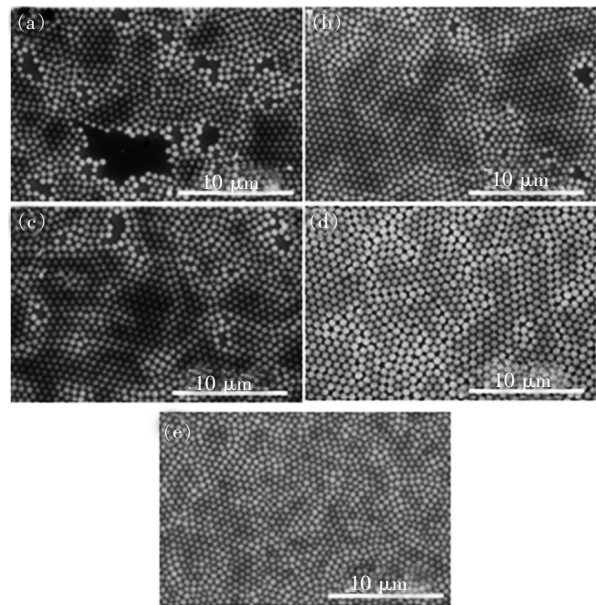


图 3 不同等离子体处理时间对纳米球薄膜自组装的影响。(a) 240 s; (b) 480 s; (c) 720 s; (d) 960 s; (e) 1 200 s。

Fig. 3 Effect of different plasma treatment time on self-assembly of nanosphere thin films. (a) 240 s. (b) 480 s. (c) 720 s. (d) 960 s. (e) 1 200 s.

等离子体处理时间。

实验结果表明, 氧气流量为 20 mL/min 及等离子体处理时间为 1 200 s 为 GaAs 的氧等离子体处理的最佳参数, 采用该参数得到的纳米球薄膜分布均匀, 排列高度有序。

图 4 为根据上述最佳参数得到的纳米球薄膜的数码照片以及利用 ICP 制备的 GaAs 纳米柱阵列 SEM 图。从图 4(a) 可以看出, 单层纳米球薄膜几乎覆盖整个 GaAs 基片, 且在自然光下, 其呈现出蓝绿色, 由此我们可以估计纳米球的粒径约为 500 ~ 600 nm; 图 4(b)、(c) 表示纳米阵列 SEM 俯视图, 可以看到纳米线直径约 300 nm, 间距约

163 nm;图4(d)为纳米阵列的45°角SEM图,经测量纳米线高度为424.2 nm。

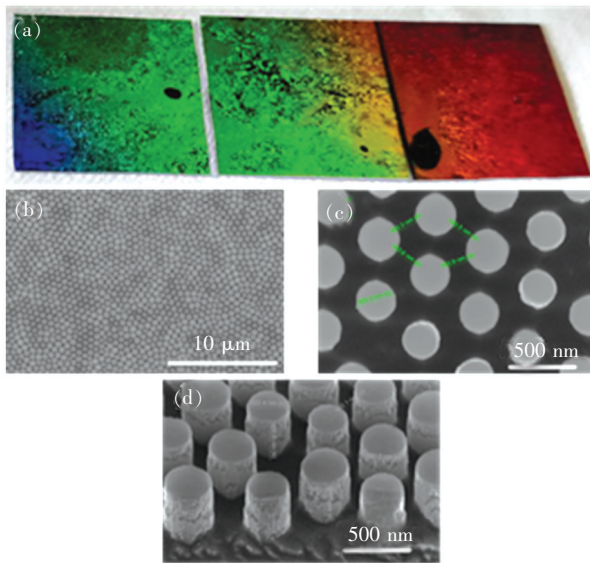


图4 (a)表面覆有单层SiO₂纳米球的GaAs基片实物图;(b)、(c)GaAs纳米阵列表面SEM形貌图;(d)GaAs纳米阵列45°角SEM侧面形貌图。

Fig. 4 (a) Physical figure of GaAs substrate with monolayer SiO₂ nanospheres on the surface. (b), (c) SEM morphology of GaAs nanometer array surface. (d) SEM profile of GaAs nanoarray at 45° angle.

图5为所制备的GaAs纳米柱阵列结构和表面无任何结构的GaAs衬底的光反射谱测试结果,测试光谱的波长范围为400~1100 nm。由图可见,纳米柱结构的表面反射率远低于GaAs衬底,且在一些波长处出现了反射谷。亚波长尺寸的高折射率半导体纳米颗粒与光场作用会激发米氏散射共振效应,在共振波长处,颗粒具有较强的散射截面和吸收截面,可以大幅度提升光场在纳米结构中的耦合效率,从而增强光吸收^[20-22]。本文所制备的GaAs纳米柱在尺寸上符合在可见光区激发米氏散射共振的要求,因此可以采用米氏散射理论进行分析。根据米氏光学共振理论,共振光波长 λ 主要由纳米柱的直径 d 决定,符合以下公式^[23]:

$$\frac{\lambda}{n} = \frac{d}{k}, \quad (1)$$

其中, n 为材料折射率实部, k 为米氏共振级数,如

$k=1,2$ 分别对应偶极子(Dipolar)和四极子(Quadrupole)共振。在可见至近红外光波段,GaAs的光学折射率约为3.6,由公式(1)可以得到直径在300~325 nm之间的GaAs纳米柱的偶极子共振波长在1100~1200 nm之间,四极子共振波长则在550~600 nm之间,与图5的反射谱结果相符合。纳米阵列使得GaAs的反射率从40%~60%降至20%以下,在某些波段最低达到5%,说明纳米柱阵列具有较强的抗反射能力,在光电子器件领域具有重要的应用价值。

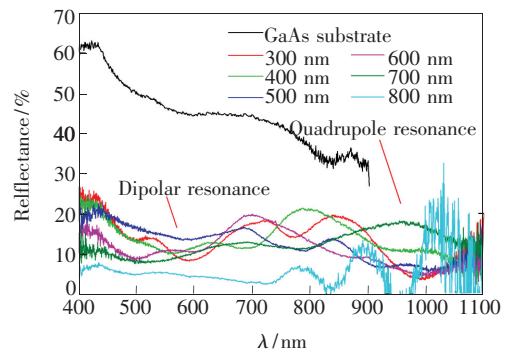


图5 不同高度GaAs纳米阵列的反射率

Fig. 5 Reflectivity of GaAs nanoarrays at different heights

4 结 论

本文首先通过Stöber法制备直径为500 nm的SiO₂纳米球,利用旋涂法在经过不同氧等离子体处理的GaAs基片表面制备SiO₂纳米球薄膜,然后利用ICP刻蚀技术制备出排列有序的GaAs纳米阵列。详细研究了不同O₂流量和处理时间对GaAs衬底表面SiO₂自组装的影响,得出了最佳的O₂流量和处理时间参数,分别为O₂ 20 mL/min,时间为1200 s,最终得到了大面积、排列高度有序的SiO₂纳米球薄膜,并利用纳米球为刻蚀阻挡层,制备出了排列有序的GaAs纳米阵列。我们还对GaAs纳米阵列进行了光学反射测试,结果表明,纳米阵列将反射率平均降至20%以下,且存在与米氏散射共振波长相符合的反射谷(吸收峰),其反射率可达5%,具有较强的抗反射能力,对GaAs在光电领域的应用具有较好的促进作用。

参 考 文 献:

- [1] COWLEY A, STEELE J A, BYRNE D, *et al.*. Fabrication and characterisation of GaAs nanopillars using nanosphere lithography and metal assisted chemical etching [J]. *RSC Adv.*, 2016, 6(36):30468-30473.

- [2] DENG W J, PENG X C, ZOU J J, *et al.* . Comparison of photoemission characteristics between square and circular wire array GaAs photocathodes [J]. *Appl. Opt.* , 2017, 56(32) :8991-8995.
- [3] ARYAL M, BUYUKSERIN F, MIELCZAREK K, *et al.* . Imprinted large-scale high density polymer nanopillars for organic solar cells [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2008, 26(6) :2562-2566.
- [4] WANG Y D, CHUA S J, TRIPATHY S, *et al.* . High optical quality GaN nanopillar arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2005, 86(7) :071917.
- [5] WANG H P, LAI K Y, LIN Y R, *et al.* . Periodic Si nanopillar arrays fabricated by colloidal lithography and catalytic etching for broadband and omnidirectional elimination of Fresnel reflection [J]. *Langmuir*, 2010, 26(15) :12855-12858.
- [6] DHINDSA N, CHIA A, BOULANGER J, *et al.* . Highly ordered vertical GaAs nanowire arrays with dry etching and their optical properties [J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(30) :305303-1-11.
- [7] SANATINIA R, AWAN K M, NAUREEN S, *et al.* . GaAs nanopillar arrays with suppressed broadband reflectance and high optical quality for photovoltaic applications [J]. *Opt. Mater. Express*, 2012, 2(11) :1671-1679.
- [8] SANATINIA R. *Ensemble and Individual III-V Semiconductor Nanopillars: Optical Properties and Applications* [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [9] KIM B J, KIM J. Fabrication of GaAs subwavelength structure (SWS) for solar cell applications [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(S3) :A326-A330.
- [10] CHO Y, GWON M, PARK H H, *et al.* . Wafer-scale nanoconical frustum array crystalline silicon solar cells: promising candidates for ultrathin device applications [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(16) :9568-9573.
- [11] MAVROKEFALOS A, HAN S E, YERCI S, *et al.* . Efficient light trapping in inverted nanopyramid thin crystalline silicon membranes for solar cell applications [J]. *Nano Lett.* , 2012, 12(6) :2792-2796.
- [12] JEONG S, MCGEHEE M D, CUI Y. All-back-contact ultra-thin silicon nanocone solar cells with 13.7% power conversion efficiency [J]. *Nat. Commun.* , 2013, 4:2950-1-7.
- [13] BRANHAM M S, HSU W C, YERCI S, *et al.* . 15.7% efficient 10- μm -thick crystalline silicon solar cells using periodic nanostructures [J]. *Adv. Mater.* , 2015, 27(13) :2182-2188.
- [14] DIEDENHOFEN S L, JANSSEN O T A, GRZELA G, *et al.* . Strong geometrical dependence of the absorption of light in arrays of semiconductor nanowires [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(3) :2316-2323.
- [15] GATES B D, XU Q B, STEWART M, *et al.* . New approaches to nanofabrication: molding, printing, and other techniques [J]. *Chem. Rev.* , 2005, 105(4) :1171-1196.
- [16] GEISLER M, XIA Y. Patterning: principles and some new developments [J]. *Adv. Mater.* , 2004, 16(15) :1249-1269.
- [17] GUO L J. Nanoimprint lithography: methods and material requirements [J]. *Adv. Mater.* , 2007, 19(4) :495-513.
- [18] SHI R, YOON J, CHANDA D, *et al.* . Performance of ultrathin silicon solar microcells with nanostructures of relief formed by soft imprint lithography for broad band absorption enhancement [J]. *Nano Lett.* , 2010, 10(8) :3041-3046.
- [19] HSU C M, CONNOR S T, TANG M X, *et al.* . Wafer-scale silicon nanopillars and nanocones by Langmuir-Blodgett assembly and etching [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2008, 93(13) :133109-1-3.
- [20] KIM E, CHO Y, PARK K T, *et al.* . Mie resonance-mediated antireflection effects of Si nanocone arrays fabricated on 8-in wafers using a nanoimprint technique [J]. *Nano. Res. Lett.* , 2015, 10:164-1-5.
- [21] FUY H, KUZNETSOV A I, MIROSHNICHENKO A E, *et al.* . Directional visible light scattering by silicon nanoparticles [J]. *Nat. Commun.* , 2013, 4:1527-1-6.
- [22] SPINELLI P, VERSCHUUREN M A, POLMAN A. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators [J]. *Nat. Commun.* , 2012, 3:692-1-5.
- [23] KUZNETSOV A I, MIROSHNICHENKO A E, BRONGERSMA M L, *et al.* . Optically resonant dielectric nanostructures [J]. *Science*, 2016, 354(6314) :2472-1-8.



王智栋(1995 -),男,山西大同人,硕士研究生,2017年于东华理工大学获得学士学位,主要从事半导体器件与微电子方面的研究。
E-mail: 1787301032@qq.com



彭新村(1982 -),男,湖南慈利县人,博士,讲师,硕士研究生导师,2010年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体器件与微电子方面的研究。
E-mail: xcpeng@ecit.cn