

# 多形貌多周期微纳米复合结构的制备及表征

王康<sup>1</sup>, 金玉<sup>1\*</sup>, 刘昱玮<sup>1</sup>, 李志祥<sup>1</sup>, 骆昕<sup>1</sup>, 吴志军<sup>1</sup>, 相春平<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> 华侨大学信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021;

<sup>2</sup> 集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 采用传统紫外光刻技术与激光双光束干涉光刻技术相结合的方法, 以及激光双光束干涉连续两次曝光的工艺方法, 制备了具有多种形貌和周期的微纳米复合结构, 解决了利用传统激光干涉加工技术制备微结构的形貌和周期单一的问题。通过优化实验条件, 制备出了微米条形光栅、矩形、圆形和六边形点阵与纳米光栅相结合的微纳米复合结构; 在玻璃/银膜/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  结构中引入微纳米复合光栅结构,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的吸收在可见光范围内得到明显增强, 这主要归因于微米光栅的散射效应和银膜/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  界面表面等离子激元的电场增强效应的共同作用。

**关键词** 光栅; 微纳米复合结构; 紫外光刻; 激光双光束干涉工艺; 多形貌; 多周期

**中图分类号** O436.1; O436.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP56.120501

## Preparation and Characterization of Multi-Morphological and Multi-Periodical Micro-Nano Composite Structures

Wang Kang<sup>1</sup>, Jin Yu<sup>1\*</sup>, Liu Yuwei<sup>1</sup>, Li Zhixiang<sup>1</sup>, Luo Xin<sup>1</sup>,

Wu Zhijun<sup>1</sup>, Xiang Chunping<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;*

<sup>2</sup> *Information Engineering College, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China*

**Abstract** In this study, the micro-nano composite structures having multiple morphologies and periods were fabricated via conventional ultraviolet photolithography combined with two-beam laser interference lithography and two-step exposure via two-beam laser interference lithography. The micro-nano composite structure could overcome the shortages imposed by conventional laser photolithography, which yields the microstructures with single morphology and period. By optimizing the experimental parameters, the micro-nano composite structures having different nano-gratings, such as micro-strip gratings, rectangular lattices, circular lattices, and hexagonal lattices, were fabricated. By incorporating the micro-nano composite grating in glass/Ag film/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , the absorption of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  is enhanced in the visible range. This enhancement is mainly attributed to the coaction of light scattering of micro-grating and electric field enhancement of surface plasmon polaritons at the Ag film/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  interface.

**Key words** grating; micro-nano composite structures; ultraviolet lithography; two-beam laser interference lithography; multi-morphology; multi-period

**OCIS codes** 050.2770; 050.1950; 050.6875

**收稿日期:** 2018-11-29; **修回日期:** 2018-12-28; **录用日期:** 2019-01-29

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(61404053, 61505056)、福建省中青年教育科研项目(JAT170324)、福建省光传输与变换重点实验室开放课题、华侨大学中青年教育科研提升资助计划(ZQN-PY508)、华侨大学研究项目(13BS419)

\* **E-mail:** jinyu1001@hqu.edu.cn; \*\* **E-mail:** chungpingxiang@jmu.edu.cn

# 1 引言

当今时代以光电子信息技术为主要特征,规则排列的微纳米阵列具有广泛的应用前景,如生物传感器、光子晶体、有机光电子器件、超疏水界面、压力传感器和表面等离子体拉曼增强测试等领域<sup>[1-10]</sup>,因此,微纳米结构的制备也备受关注。随着微纳米加工技术的日趋成熟,微纳米结构的制备技术已呈现百家争鸣的趋势。目前,微纳米加工技术主要包括光刻技术、纳米压印、分子自组装、激光加工技术、扫描电子束刻蚀和离子束刻蚀技术等<sup>[11-14]</sup>。1995年,华裔科学家美国普林斯顿大学 Chou 等<sup>[15]</sup>首次提出了纳米压印技术,并且制备了 25 nm 大小的特征图形。2016年,日本熊本大学的 Lee 等<sup>[16]</sup>采用分子自组装技术,在有机薄膜太阳能电池中引入周期为 500 nm 的光栅结构。2017年,中国吉林大学孙洪波团队,利用激光干涉多角度多次曝光的方法,制备出具有超疏水特性的微纳米光栅结构<sup>[17]</sup>。

与传统的扫描电子束刻蚀、离子束刻蚀等工艺相比,纳米压印以及分子自组装技术的制造成本更低,但也存在一些不足,如纳米压印对模具制造以及图形转移的工艺条件要求十分苛刻,制备的微结构均匀性差、平坦度低<sup>[18]</sup>;分子自组装技术是分子自发形成微结构的过程,所以分子自组装技术受多种因素的制约,不仅对材料选择要求苛刻,还需精确控制分子自组装的条件,且制备的微结构重复性不高<sup>[19]</sup>。与分子自组装和纳米压印技术相比,激光加工技术是一种更成熟的微加工方式,利用不同波长不同类型的激光与不同材料(金属,光刻胶,有机薄膜)相互作用,可以在材料表面制备出微结构。激光加工技术具有高效、简易、绿色无污染等诸多优点。

激光加工方法主要分为三维直写加工<sup>[20]</sup>和干涉加工<sup>[21-23]</sup>。激光三维直写加工方法可以实现复杂的三维微结构的加工,但加工时间长、效率低,难以用于批量生产。激光干涉加工方法通过两束或多束激光光束叠加产生干涉场,并作用于材料,可以大幅提高加工效率,并且无需掩模、系统简易、加工面积大、成本低。目前激光干涉加工技术应用广泛。

利用传统激光干涉加工技术一次曝光制备的微结构形貌过于单一,可调谐性差。为了在同一种材料表面获得多形貌、多周期、结构复杂、具有高重复性的准三维微纳米结构,本文利用光刻技术和激光干涉技术相结合的方法以及激光干涉技术连续两次曝光的工艺方法,制备了多形貌、多周期、可调谐的准三维微纳米复合结构。

## 2 微纳米复合结构的制备及结果讨论

### 2.1 微纳米复合结构的加工原理

本文利用传统紫外光刻技术与激光双光束干涉光刻技术相结合的方法,制备出多形貌、多周期、可调谐的准三维的微纳米复合结构。图 1(a)为紫外光刻机工作原理流程图,采用的是中国科学院光电技术研究所生产的型号为 URE-2000/17 型的深紫外光刻机。以交流汞灯为光源,波长为 365 nm,输出功率为 200 mW。汞灯发出的光经过收集,聚焦至曝光系统后,变为平行光,曝光面积可达 100 mm<sup>2</sup>。光源下方为掩模板,紫外平行光束通过掩模板照射到光刻胶薄膜表面,可以实现图案化的曝光。光刻胶分为负性光刻胶和正性光刻胶,使用美国 MicroChem 公司生产的型号为 SU-8-2000 系列的负性光刻胶作为加工材料,负性光刻胶受紫外光照射后,小分子的有机分子将聚合成为大分子的聚合物,显影后形成图案<sup>[24]</sup>。

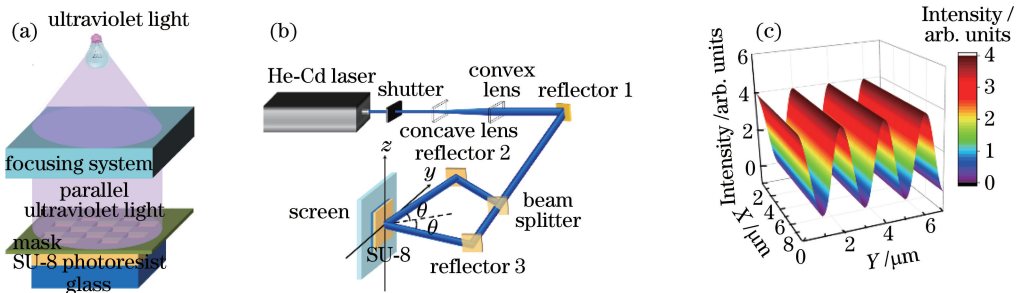


图 1 工艺原理及干涉光场分布图。(a)光刻工艺原理;(b)激光双光束干涉光刻工艺原理;  
(c)激光双光束干涉光场分布

Fig. 1 Principle of process and interference light field distribution. (a) Principle of lithography; (b) principle of two-beam laser interference lithography; (c) two-beam laser interference light field distribution

图 1(b)为激光双光束干涉光刻工艺原理图,采用日本 Kimmon 公司生产的型号为 IK3501R-G 单模 He-Cd 气体激光器产生的波长为 325 nm 的紫外激光作为干涉光源,其输出功率为 50 mW,输出模式为 TEM<sub>00</sub> 模。激光器出射的激光首先通过快门对激光的通断进行控制,再通过由凹透镜和凸透镜组成的扩束准直系统,将激光光斑面积扩至直径约为 1 cm 的光斑,经反射镜 1 将激光的方向顺时针旋转 135°,之后经过激光分束镜,将入射激光分为光强相同的两束激光,最后经过反射镜 2 和 3 反射后会聚到具有光刻胶玻璃衬底的光屏表面。会聚的两束激光具有相干性,将发生干涉现象,激光的场强会重新分布。根据电磁波理论,两束相干激光干涉后的场强分布可表示为

$$I = 2A^2 [1 + \cos(2ky \sin \theta)], \quad (1)$$

式中: $k$  为入射单色光的波数; $y$  为坐标轴方向的变量; $\theta$  为入射激光入射角; $A$  为常数。图 1(c)为计算的两束激光干涉光场的分布图,干涉光场的周期为 2  $\mu\text{m}$ ,可以看出,激光的干涉光场为类余弦分布。干涉后激光照射到 SU-8 光刻胶薄膜,在 SU-8 光刻胶薄膜内部形成与光场分布相同的曝光强度。

由  $k = 2\pi/\lambda$  可得

$$I = 2A^2 \left[ 1 + \cos\left(2\pi y \frac{2\sin \theta}{\lambda}\right) \right]. \quad (2)$$

干涉光场分布周期为

$$T = \frac{\lambda}{2\sin \theta}, \quad (3)$$

式中: $\lambda$  为入射光波长,通过调节  $\theta$  值,可以实现对干涉光场周期的调控<sup>[25-26]</sup>。

## 2.2 光刻工艺与激光双光束干涉光刻工艺结合制备微纳米复合结构

制备工艺步骤如下:1) 清洁玻璃衬底。使用丙酮和乙醇棉球反复擦拭玻璃衬底,再依次放入丙酮、乙醇和去离子水中进行超声清洗,用氮气吹干,再放入热烘箱烘干 10 min,取出待冷却后使用。2) 制备光刻胶薄膜。图 2(a)为光刻工艺与激光双光束干涉工艺相结合的微纳米复合结构制备流程。采用旋涂的方式,在清洁后的玻璃衬底表面制备厚度约为 200 nm 的 SU-8 光刻胶薄膜,再将 SU-8 光刻胶玻璃衬底置于 95 °C 的热烘台上坚膜 3 min,冷却。3) 紫外光刻与激光双光束干涉连续曝光。将坚膜后的 SU-8 光刻胶玻璃衬底置于光刻机载物台,并与掩模板对准,进行第一次曝光,曝光时间为 1 s。设计的多种图案的掩模板如图 2(b), (c), (d) 和 (e) 所示,分别为条形、矩形点阵、圆形点阵和六边形点阵的掩模板的显微镜照片。将 SU-8 光刻胶玻璃衬底置于激光双光束干涉光路中的光屏,如图 1(b) 所示,进行第二次曝光,曝光时间为 70 ms。将曝光后的 SU-8 光刻胶玻璃衬底置于 95 °C 热烘台烘干 3 min,冷却。4) 显影。将曝光后的 SU-8 光刻胶玻璃衬底放入 SU-8 专用显影液中显影 100 s,以去除未聚合的光刻胶,显影后再用氮气吹干,即得不同形貌不同周期的复合微纳米结构。

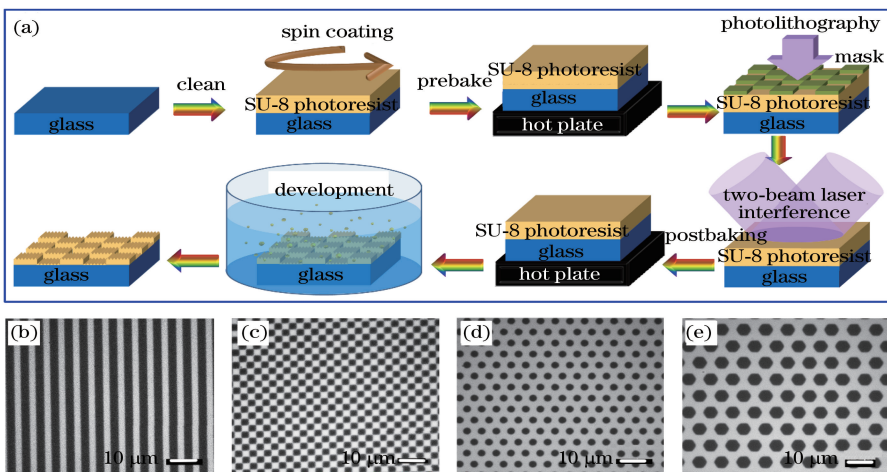


图 2 微纳米复合结构制备流程及不同形貌掩模板显微镜照片。(a)光刻工艺与激光双光束干涉工艺相结合的微纳米复合结构制备流程;(b)条形;(c)矩形点阵;(d)圆形点阵;(e)六边形点阵

Fig. 2 Preparation process of micro-nano composite structure and microscope photos of masks with different patterns. (a) Preparation process of micro-nano composite structure using lithography combined with two-beam laser interference lithography; (b) strip; (c) rectangular lattices; (d) circular lattices; (e) hexagonal lattices

图3为原子力显微镜(AFM)照片和三维照片,其中 $X$ 轴为复合结构长度, $Y$ 轴为复合结构宽度, $Z$ 轴为复合结构的高度。图3(a)和(b)为周期为 $6\ \mu\text{m}$ 的条形光栅与周期为 $350\ \text{nm}$ 的类余弦光栅的复合结构的AFM平面照片和三维照片。通过改变第二次曝光时SU-8光刻胶玻璃衬底的方向,可以实现微米结构与纳米结构空间取向的调节。图3(a)为条形微米光栅与纳米光栅平行分布的复合结构,可以看出,微米光栅的截面为矩形,起伏高度约为 $94\ \text{nm}$ ;周期为 $350\ \text{nm}$ 的光栅主要分布在微米光栅矩形凸起部分表面,起伏高度约为 $16\ \text{nm}$ ,且形貌均匀,清晰可见。图3(b)为条形微米光栅与纳米光栅垂直分布的复合结构,可以看出,周期为 $350\ \text{nm}$ 的光栅分布在整个大周期表面,起伏高度约为 $16\ \text{nm}$ ,微米周期光栅的起伏高度为 $135\ \text{nm}$ 。通

过改变掩模板的图案,还可以制备出更加复杂的微纳米复合结构。图3(c)为周期为 $6\ \mu\text{m}$ 的矩形点阵与周期为 $350\ \text{nm}$ 的类余弦光栅的复合结构的AFM平面照片和三维照片。可以看出,周期为 $350\ \text{nm}$ 的光栅平铺于微米矩形点阵表面,在微米矩形点阵的凹陷处略有变形,这主要由显影过程中显影液的扰动引起,起伏高度约为 $27\ \text{nm}$ ,微米矩形点阵的起伏高度约为 $50\ \text{nm}$ ,其整体均匀性与条形复合结构相比略差。图3(d)和(e)为直径为 $3\ \mu\text{m}$ 的圆形点阵和边长为 $3\ \mu\text{m}$ 的六边形点阵分别与周期 $350\ \text{nm}$ 的类余弦光栅的复合结构的AFM平面照片和三维照片。可以看出,选择不同图案的掩模板,可以制备出多种形貌的微米结构与纳米结构相结合的复合结构,从而实现微纳米复合结构形貌的多样化。

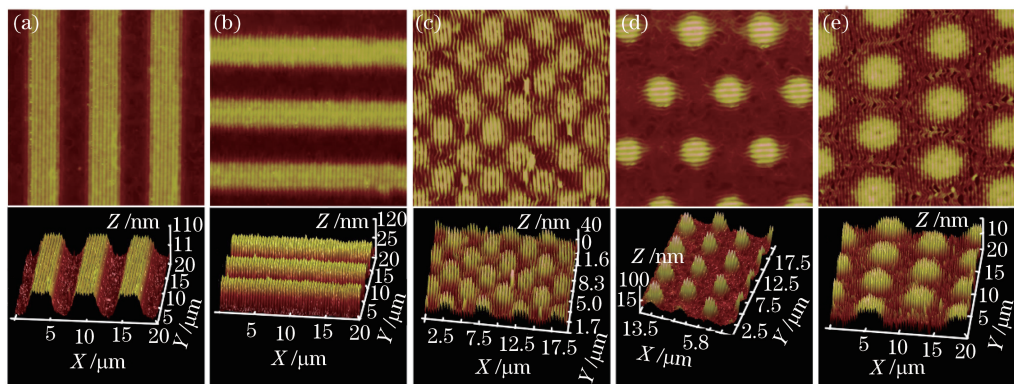


图3 AFM照片。(a)条形微米光栅与纳米光栅平行分布的复合结构;(b)条形微米光栅与纳米光栅垂直分布的复合结构;(c)微米矩形点阵与纳米光栅相结合的复合结构;(d)微米圆形点阵和纳米光栅相结合的复合结构;(e)微米六边形点阵与纳米光栅相结合的复合结构

Fig. 3 AFM images. (a) Composite structure with micro-strip grating and nano-grating in parallel orientation; (b) composite structure with micro-strip grating and nano-grating in vertical orientation; (c) composite structure with micro-rectangular lattices combined with nano-grating; (d) composite structure with micro-circular lattices combined with nano-grating; (e) composite structure with micro-hexagonal lattices combined with nano-grating

同时,通过改变掩模板中图案的周期以及激光双光束干涉中两束激光的夹角,可以制备出不同周期的微米结构与纳米结构相结合的复合结构。图4(a)~(c)分别为周期为 $4, 5, 6\ \mu\text{m}$ 的微米光栅与周期为 $350\ \text{nm}$ 的纳米光栅相结合的复合结构的AFM平面照片和三维照片。其中 $X$ 轴为复合结构长度, $Y$ 轴为复合结构宽度, $Z$ 轴为复合结构高度。从AFM照片可以看出,随着微米光栅周期逐渐减小,纳米光栅形貌未受影响,并均匀分布在微米光栅顶部,纳米光栅结构清晰、完整,且形貌无明显瑕疵。通过改变激光双光束曝光中两束激光的夹角,还可以实现对纳米光栅周期的调节<sup>[27]</sup>,从而实现微纳米

复合结构周期的多样化。

因此,通过改变掩模板中图案的形貌、周期、激光双光束干涉光路中两束激光的夹角,以及两次曝光中SU-8光刻胶玻璃衬底的取向,可以实现微纳米复合结构形貌和周期的多样化。

### 2.3 激光双光束干涉连续两次曝光制备微纳米复合结构

与2.2节中的制备方法不同,将坚膜后的SU-8光刻胶玻璃衬底直接放置于激光双光束干涉光路中的光屏,如图1(b)所示,调节两束激光夹角为 $2\theta = 9.32^\circ$ (周期 $2\ \mu\text{m}$ ),进行第一次曝光,曝光时间为 $75\ \text{ms}$ ,再调节两束激光夹角为 $2\theta = 55.32^\circ$ (周期

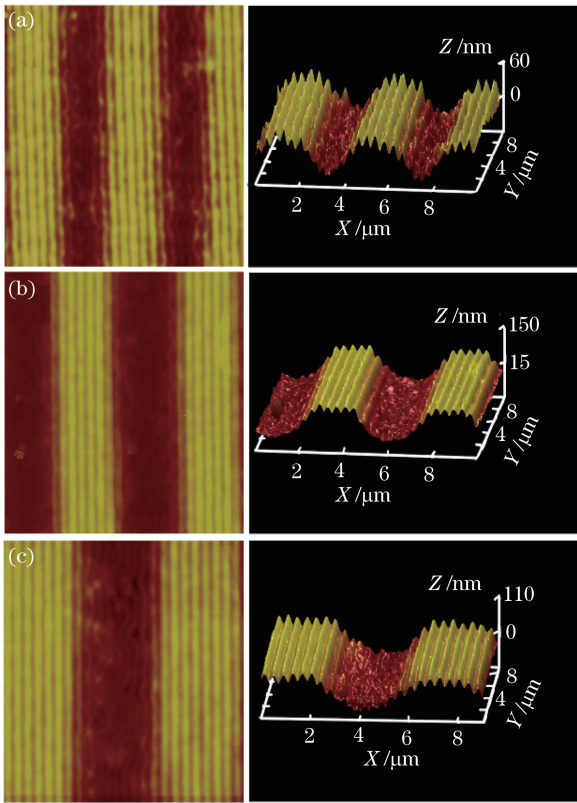


图4 不同周期的微米光栅与纳米光栅相结合的复合结构 AFM 照片。(a)  $4\ \mu\text{m}$ ; (b)  $5\ \mu\text{m}$ ; (c)  $6\ \mu\text{m}$

Fig. 4 AFM images of composite structures with nano-grating combined with micro-gratings with different periods. (a)  $4\ \mu\text{m}$ ; (b)  $5\ \mu\text{m}$ ; (c)  $6\ \mu\text{m}$

$350\ \text{nm}$ ), 进行第二次曝光, 曝光时间为  $65\ \text{ms}$ , 之后进行后烘显影工艺, 即可得微纳米复合条形光栅结构, 如图 5 所示。其中  $X$  轴为复合结构长度,  $Y$  轴为复合结构宽度,  $Z$  轴为复合结构高度。图 5(a) 为激光双光束干涉一次曝光制备的周期为  $2\ \mu\text{m}$  的条形光栅结构的 AFM 照片, 从三维截面图可以看出, 光栅呈类余弦分布, 起伏高度约为  $170\ \text{nm}$ 。通过改变两次曝光中两束激光的夹角, 可以实现微米光栅与纳米光栅的复合, 图 5(b) 为不改变 SU-8 光刻胶玻璃衬底的取向, 只改变两次曝光中激光的夹角制备出的微米光栅与纳米光栅平行分布的复合结构 AFM 照片, 其中微米光栅周期为  $2\ \mu\text{m}$ , 纳米光栅周期为  $350\ \text{nm}$ 。可以看出, 微米与纳米光栅的横截面均为类余弦结构, 且纳米光栅均匀平铺于微米光栅的表面。微米光栅的起伏高度约为  $105\ \text{nm}$ , 纳米光栅的起伏高度约为  $20\ \text{nm}$ 。第二次曝光时将 SU-8 光刻胶衬底旋转  $90^\circ$ , 同时改变两次曝光中两束激光的夹角, 可制备出微纳米复合光栅结构 AFM 照片, 如图 5(c) 所示。可以看出, 微米光栅与纳米

光栅垂直分布, 且复合结构表面光滑, 微米光栅起伏高度约为  $120\ \text{nm}$ , 纳米光栅的起伏高度约为  $10\ \text{nm}$ 。

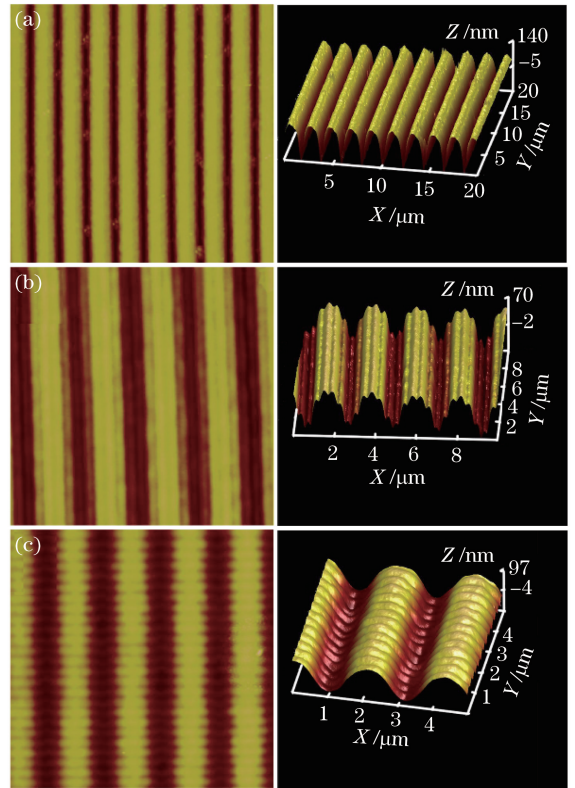


图5 AFM 照片。(a) 周期为  $2\ \mu\text{m}$  的条形光栅结构; (b) 周期为  $2\ \mu\text{m}$  的微米光栅与纳米光栅平行分布的复合结构; (c) 周期为  $2\ \mu\text{m}$  的微米光栅与纳米光栅垂直分布的复合结构

Fig. 5 AFM images. (a) Strip-grating with period of  $2\ \mu\text{m}$ ; (b) composite structure with nano-grating and micro grating with period of  $2\ \mu\text{m}$  in parallel orientation; (c) composite structure with nano-grating and micro grating with period of  $2\ \mu\text{m}$  in vertical orientation

因此, 通过改变两次曝光中 SU-8 光刻胶玻璃衬底的取向以及两次曝光中激光的夹角, 可以实现微纳米复合结构周期和形貌的多样化。

#### 2.4 微纳米复合光栅对钙钛矿材料吸收的影响

微纳米复合结构可以广泛应用于有机电致发光器件、有机太阳能电池及钙钛矿太阳能电池和超疏水界面等领域。针对微纳米复合结构对钙钛矿电池中钙钛矿材料吸收的影响进行了初步研究。图 6 (a) 为具有微纳米复合光栅的玻璃/光刻胶/Ag 膜/甲铵三碘铅酸盐( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ )的介质/金属/介质的 IMI 结构, 这种 IMI 结构普遍存在于钙钛矿太阳能电池结构。其中衬底为玻璃, 光栅结构为 SU-8

光刻胶,微米光栅周期为  $6\ \mu\text{m}$ ,光栅高度为  $80\ \text{nm}$ ,纳米光栅周期为  $260\ \text{nm}$ ,光栅高度为  $30\ \text{nm}$ ,Ag膜厚度为  $30\ \text{nm}$ , $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的厚度为  $100\ \text{nm}$ 。利用有限差分时间域算法(FDTD)分析了该 IMI 结构中钙钛矿材料  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的吸收特性,材料的折射率选自参考文献[28]。图 6(b)为平面结构、具有微米光栅结构、纳米光栅结构和微纳米复合光栅结构的 IMI 结构中钙钛矿材料  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的吸收曲线。从曲线可以看出,当光以  $0^\circ$  入射角入射时,具有微米光栅的 IMI 结构中钙钛矿材料  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的吸收在  $500\sim 750\ \text{nm}$  范围内高于平面结构;并且当入射角增至  $20^\circ$  时, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  在整个可见光波长范围内吸收都被加强,并且明显高于光入射角为  $0^\circ$  的情况,说明微米光栅对入射光

具有很好的散射作用,从而增加了  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的光吸收。当光入射角为  $0^\circ$  时,具有纳米光栅的 IMI 结构中  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  在  $550\sim 750\ \text{nm}$  范围内吸收明显增强,这主要是由于纳米光栅结构激发了银膜与  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  界面的表面等离子激元(SPPs),SPPs 诱导的场增强效应可有效增加  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的吸收;具有复合微纳米光栅的 IMI 结构中  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的吸收明显高于其他 3 种结构,并且吸收的增加量接近于具有微米光栅和纳米光栅结构光吸收增量的总和,因此可以看出,微纳米复合结构兼顾了微米结构和纳米结构的共同作用,微米光栅的光散射机制和纳米光栅诱导的 SPPs 场增强机制有效提升了  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  在 IMI 结构中光吸收强度。

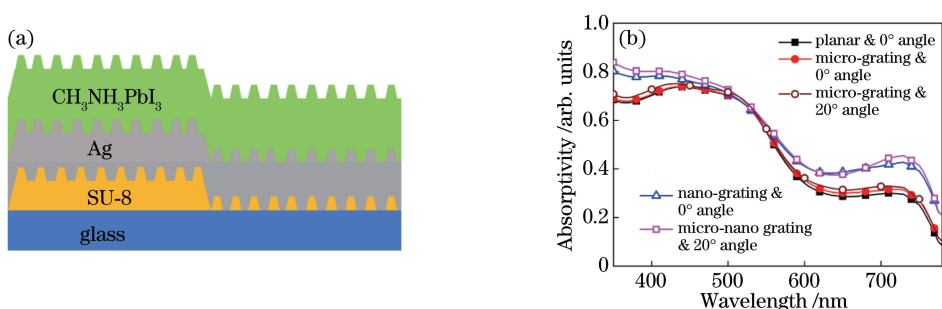


图 6 IMI 结构示意图及其结构中  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  吸收光谱。(a)具有微纳米复合光栅结构的 IMI 结构示意图;(b)具有不同光栅结构的 IMI 结构中  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的吸收光谱

Fig. 6 Structural diagram of IMI and absorption spectra of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  in IMI structure. (a) Structural diagram of IMI with micro-nano composite grating; (b) absorption spectra of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  in IMI structures with different gratings

### 3 结 论

采用紫外光刻技术与激光双光束干涉技术相结合的方法以及激光双光束干涉技术两次曝光的方法,成功制备出了周期为  $4, 5, 6\ \mu\text{m}$  条形微米光栅与周期为  $350\ \text{nm}$  条形光栅结合的微纳米复合结构以及微米条形、矩形点阵、圆形点阵和六边形点阵与纳米条形光栅结合的微纳米复合结构等结构,实现了在单一材料表面经过一次加工,制备出形貌和周期可调的微纳米复合结构。制备过程更加简单,成本更加低廉,制备精度和重复性更高;与单一周期的微结构相比,微纳米复合结构层次更加复杂。通过引入微纳米复合光栅结构,利用微纳米复合光栅诱导的光散射以及 SPPs 的电场增强作用,玻璃/光刻胶/银膜/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  结构中  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  光吸收强度在  $350\sim 780\ \text{nm}$  范围内得到明显增强。

### 参 考 文 献

- [1] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, *et al.* Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography [J]. Nature, 2000, 404(6773): 53-56.
- [2] Wu D, Chen Q D, Niu L G, *et al.* 100% fill-factor aspheric microlens arrays (AMLA) with sub-20-nm precision [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(20): 1535-1537.
- [3] Jin Y, Feng J, Zhang X L, *et al.* Solving efficiency-stability tradeoff in top-emitting organic light-emitting devices by employing periodically corrugated metallic cathode [J]. Advanced Materials, 2012, 24 (9): 1187-1191.
- [4] Jin Y, Feng J, Wang Y H, *et al.* Improved performance of ITO-free organic solar cells using a low-workfunction and periodically corrugated metallic cathode [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5):

- 1737-1743.
- [5] Wu D, Chen Q D, Yao J, *et al.* A simple strategy to realize biomimetic surfaces with controlled anisotropic wetting[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(5): 053704.
- [6] Wood R W. XLII. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1902, 4(21): 396-402.
- [7] Fägerstam L G, Frostell-Karlsson Å, Karlsson R, *et al.* Biospecific interaction analysis using surface plasmon resonance detection applied to kinetic, binding site and concentration analysis[J]. *Journal of Chromatography A*, 1992, 597(1/2): 397-410.
- [8] 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.
- [9] Li W, Liu C, Lü J W, *et al.* LSPR properties of metal-compound-graphene composite nanoarray structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*. 2018, 55(8): 082401.  
李伟, 刘超, 吕靖薇, 等. 金属/化合物/石墨烯复合纳米阵列结构的 LSPR 特性[J]. *激光与光电子学进展*. 2018, 55(8): 082401.
- [10] Bai Y F, Fan J, Zou Y G, *et al.* Fabrication of gratings used in 976 nm distributed feedback lasers based on laser interference lithography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120501.  
白云峰, 范杰, 邹永刚, 等. 激光干涉光刻制备 976 nm 分布反馈式激光器光栅[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120501.
- [11] Tseng A A, Chen K, Chen C D, *et al.* Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2003, 26(2): 141-149.
- [12] Fujita J, Ohnishi Y, Ochiai Y, *et al.* Ultrahigh resolution of calixarene negative resist in electron beam lithography [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(9): 1297-1299.
- [13] Watt F, Bettiol A A, van Kan J A, *et al.* Ion beam lithography and nanofabrication: a review [J]. *International Journal of Nanoscience*, 2005, 4(3): 269-286.
- [14] Springham S V, Osipowicz T, Sanchez J L, *et al.* Micromachining using deep ion beam lithography[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1997, 130: 155-159.
- [15] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(21): 3114-3116.
- [16] Lee J H, Takafuji M, Sagawa T, *et al.* Reappraising the validity of poly(3-hexylthiophene) nanostructures in interdigitated bilayer organic solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 147: 68-74.
- [17] Abid M I, Wang L, Chen Q D, *et al.* Angle-multiplexed optical printing of biomimetic hierarchical 3D textures[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1600187.
- [18] Guo L. Nanoimprint lithography: methods and material requirements [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(4): 495-513.
- [19] Lee O P, Yiu A T, Beaujuge P M, *et al.* Efficient small molecule bulk heterojunction solar cells with high fill factors via pyrene-directed molecular self-assembly[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(45): 5359-5363.
- [20] Kondo T, Yamasaki K, Juodkazis S, *et al.* Three-dimensional microfabrication by femtosecond pulses in dielectrics[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453/454: 550-556.
- [21] Shoji S, Kawata S. Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser interference into a photopolymerizable resin [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(19): 2668-2670.
- [22] Kawamura K I, Sarukura N, Hirano M, *et al.* Periodic nanostructure array in crossed holographic gratings on silica glass by two interfered infrared-femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(9): 1228-1230.
- [23] Jin Y, Feng J, Zhang X L, *et al.* Broadband absorption enhancement in organic solar cells with an antenna layer through surface-plasmon mediated energy transfer[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(22): 223303.
- [24] Ito T, Okazaki S. Pushing the limits of lithography [J]. *Nature*, 2000, 406(6799): 1027-1031.
- [25] Jin Y, Feng J, Xu M, *et al.* Matching photocurrents of sub-cells in double-junction organic solar cells via coupling between surface plasmon polaritons and microcavity modes[J]. *Advanced Optical Materials*,

- 2013, 1(11): 809-813.
- [26] Jin Y, Zou D H, Wang K, *et al.* Optimization of period and thickness of the corrugated Ag cathode for efficient cross coupling between SPP and microcavity modes in top-emitting OLEDs[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(6): 2096-2101.
- [27] Jin Y, Feng J, Zhang X L, *et al.* Surface-plasmon enhanced absorption in organic solar cells by employing a periodically corrugated metallic electrode [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101 (16): 163303.
- [28] Löper P, Stuckelberger M, Niesen B, *et al.* Complex refractive index spectra of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite thin films determined by spectroscopic ellipsometry and spectrophotometry [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6(1): 66-71.