

文章编号: 1005-4642(2023)03-0022-07

## 劳埃德式紫外激光干涉光刻实验

钟晓岚, 宋佳奇, 李晓苗, 姚旭, 严琪琪, 金硕

(北京航空航天大学物理学院, 北京 100191)

**摘要:** 搭建了劳埃德式紫外激光干涉光刻系统, 利用劳埃德镜产生双光束分波阵面干涉, 通过精确调整、控制光束的入射角, 设计了曝光图样. 基础实验部分可以完成一维光栅制备, 分析光栅周期与波长、入射角的关系; 在拓展实验中, 制备设计部分可以完成二维点阵或准晶结构制备, 前沿拓展部分可以制备表面等离子体极化激元微腔. 基于劳埃德式激光干涉光刻实验操作便捷、展示度高, 同时涵盖光干涉原理的介绍和光路调整、样品制备和表征等实验内容, 有助于学生掌握激光干涉光刻的实验技能.

**关键词:** 劳埃德镜; 紫外激光干涉; 激光光刻; 微纳米技术

**中图分类号:** TN305.7; O436.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.03.003

光与物质强耦合相互作用是新兴且极具应用前景的操控物态的方法<sup>[1]</sup>. 当光学微腔与粒子发生超快能量交换产生拉比劈裂时, 系统进入强耦合状态, 形成 2 个新的激子极化激元态:  $|P+\rangle$  和  $|P-\rangle$ , 是具有量子特点的非局域纠缠态, 拥有光子和物质的双重特性, 这种杂化态的存在可以改变载流子的输运性质、调节功函数、实现超低阈值的激子极化激元激射、提高非辐射能量转移效率、操控基态化学反应等. 因此, 探索光与物质强耦合相互作用及其对新奇物态调控与操纵, 将有助于学生从全新的视角来理解量子科学和光电子技术革命<sup>[2]</sup>.

光学微腔可以提供高度局域的能量分布以及有限个离散的模式数目, 在光与物质强耦合相互作用中起到决定性作用<sup>[3]</sup>. 常见的光学微腔有布拉格反射式法布里-珀罗微腔 (DBR-FP)、金属法布里-珀罗微腔 (金属-FP)、表面等离子体极化激元腔 (金属 SP) 等, 其结构如图 1 所示, 其中图 1(c) 中金属 SP 为平面式, 金属孔阵列 SP 为周期孔阵列式.

金属 SP 腔可以提供局域在金属/介质界面处的光学模式, 即表面等离子体极化激元, 其局域

共振波长与金属 SP 腔的周期直接相关. 由金属 SP 腔提供的光学模式呈现在界面处, 与 DBR-FP 腔和 FP 腔相比, 更易与低维量子材料发生强耦合相互作用, 当表面等离子体极化激元的共振波长与低维量子材料的激子波长相同且满足拉比振荡条件时, 系统进入强耦合模式, 产生许多新奇的物化现象, 具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>. 因此, 制备结构可控、品质因子高的金属 SP 腔是重要的研究内容.

目前, 制备手段主要包括聚焦离子束刻蚀、电子束曝光、纳米压印以及激光干涉光刻等. 其中, 激光干涉光刻是微纳米加工中最常见的技术之一<sup>[5-6]</sup>, 利用光的干涉原理以及光与物质相互作用“自上而下”实现光刻的微纳米加工技术<sup>[7-8]</sup>, 适合大面积制备一维/二维/准周期性结构. 基于该光刻技术制备金属 SP 腔具有制备效率高、品质因子好、结构灵活可控等优点. 在本科生基础物理专题实验中, 增设激光干涉光刻实验, 将其应用到周期与准周期微纳结构的制备中, 为学生深入探索光学微腔在光与物质强耦合相互作用过程中的重要作用提供实验基础, 有助于学生站在前沿科学与新奇物态调控的角度, 学习并掌握该技术.

**收稿日期:** 2022-12-19; **修改日期:** 2023-02-13

**基金项目:** 北京航空航天大学研究生教育与发展研究专项基金资助 (No. JG2022017); 北京高校本科教学改革创新项目资助 (No. 202210006003)

**作者简介:** 钟晓岚 (1986—), 女, 北京人, 北京航空航天大学物理学院副教授, 博士, 研究方向为光子-电子-离子耦合与多功能物态调控. E-mail: zhongxl@buaa.edu.cn

**通信作者:** 金硕 (1976—), 女, 辽宁鞍山人, 北京航空航天大学物理学院教授, 博士, 研究方向为金属材料缺陷物理. E-mail: jinshuo@buaa.edu.cn

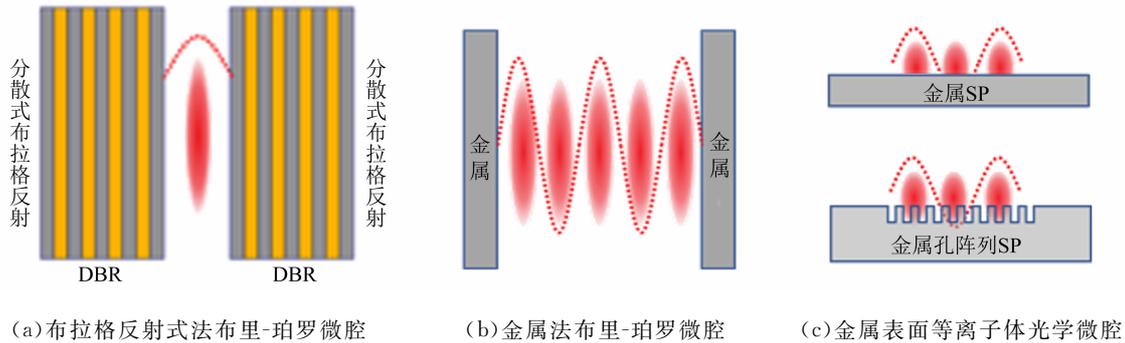


图 1 光学微腔示意图

## 1 实验原理

### 1.1 激光光刻的工作原理

激光光刻技术<sup>[9]</sup>是通过激光干涉来设计所需图形,并记录在光刻胶上,然后将制备的纳米结构转移到所需要的基底上.其中,光刻胶是集成电路、平板显示和电子电路制造的核心材料之一,通常又被称为光致抗蚀剂,主要由树脂、感光剂以及溶剂组成.当光刻胶被紫外线、电子束、准分子激光束等光源辐照后,其溶解性、亲和性发生变化,再通过显影液,将易溶解的位置溶解,即可得到所需的精细图形.一般情况下,光刻胶分为正性光刻胶和负性光刻胶 2 种,正性光刻胶在曝光后主要发生降解反应,曝光区域易溶解到显影液中;负性光刻胶在曝光后主要发生交联反应,未曝光区域易溶解到显影液中.负性光刻胶在曝光显影后,存在膨胀现象,导致图形转移不良,因此负性光刻胶一般不用于制备特征尺寸为亚微米的结构.

### 1.2 劳埃德式紫外激光干涉条纹的产生

基于劳埃德镜的激光干涉光刻系统是利用劳埃德镜产生双光束分波振面干涉的原理<sup>[7,10]</sup>,通过精确调整、控制光束的入射角度,设计出所需的曝光图样.

北京航空航天大学紫外激光光刻实验室搭建的劳埃德式紫外激光干涉光刻系统光路如图 2 所示,激光依次经透镜 1、光阑、透镜 2 组成的扩束系统后,一部分光经与样品架垂直放置的劳埃德镜反射后照射到样品上,另一部分光直接照射到置于样品架的样品上,这 2 束光满足相干条件,在样品上相遇叠加发生干涉,形成干涉条纹.紫外激光器的中心波长为 325 nm,入射到样品上的角

度为  $\theta$ ,样品架与劳埃德镜严格垂直且与样品严格平行,具体结构细节如图 3 所示.

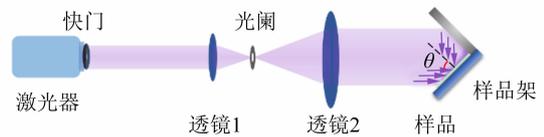


图 2 劳埃德式紫外激光干涉原理图

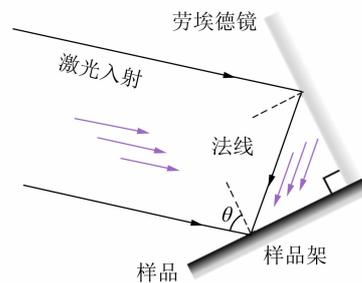


图 3 激光入射到样品光路图

假设单模激光器发出的光近似为单色光,根据光的电磁波理论,干涉后在样品处的光强  $I$  分布为

$$I = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2 \cos(2k_0 x \sin \theta), \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{E}_1$  和  $\mathbf{E}_2$  分别为单色光的电场强度矢量,  $\theta$  为激光入射到样品上的入射角,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为入射波长,  $x$  为样品位置坐标. 在样品上即可得到明暗相间的一维周期结构,其周期为

$$T = \frac{\pi}{k_0 \sin \theta} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}. \quad (2)$$

由式(2)可以得出:随着  $\theta$  增大或  $\lambda$  减小,周期  $T$  将会变小. 采用激光光刻制造更精细结构的关键因素是光的波长大小,波长越短,其可加工的最小周期单元越精细. 激光干涉光刻技术的系统分辨率极限约为所用光源波长的  $1/2$ ,因此本实验选

用紫外激光器作为光源. 此外, 虽然紫外光场不可见, 在光路调节方面的难度有所增加, 但紫外光刻技术已相对成熟, 且本实验中所涉及的光路已经过校准, 学生只需调整劳埃德镜及样品架即可完成实验, 提升了实验的便捷性.

除了光束入射角度以及入射波长会对光刻结果产生影响外, 光束的偏振状态、曝光时间也会对干涉条纹产生影响, 从而直接影响光刻结果. 本实验中所用激光器为中心波长为 325 nm 的线偏振紫外激光器, 曝光时间由光强及光刻胶确定, 下面讨论线偏振光的偏振状态对干涉条纹的影响.

假设 2 束光的振幅分别为  $E_1$  和  $E_2$ , 电矢量振动方向的夹角为  $\gamma$  ( $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ ), 则可以得到干涉条纹对比度  $M$  与  $E_1, E_2$  和  $\gamma$  的关系为

$$M = \frac{2E_1 E_2}{E_1^2 + E_2^2} \cos \gamma. \quad (3)$$

从式(3)可以看出: 若 2 束光的振幅不变, 干涉条纹的对比度将随  $\gamma$  变化而变化. 当  $\gamma = 0^\circ$ , 即 2 束光的电矢量振动方向相同, 干涉条纹对比度最大  $M = \frac{2E_1 E_2}{E_1^2 + E_2^2}$ ; 当  $\gamma = 90^\circ$ , 即 2 束光的电矢量振动方向相互垂直, 此时对比度为 0, 干涉光强在空间均匀分布; 当  $0^\circ < \gamma < 90^\circ$  时, 对比度单调递减. 不同  $\gamma$  时, 干涉条纹的强度随位置的变化如图 4 所示. 因此在实际光路中, 想要获得对比度高的干涉条纹, 就需要 2 束光的  $\gamma$  尽可能相同.

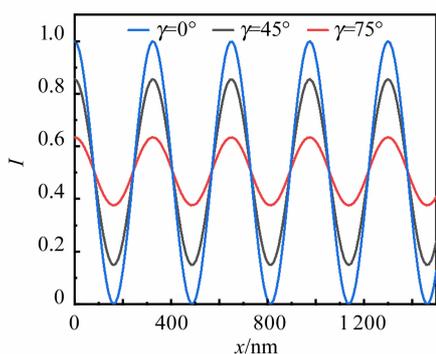


图 4  $\gamma$  对光强分布的影响

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置

实验装置图如图 2 所示, 使用的紫外激光器为日本 KIMMON 公司(型号 IK3301R-G)的线偏振激光器, 激光光束的发散角为 0.5 mrad, 出射

中心波长为 325 nm, 束腰半径约为 0.414 mm; 透镜 1 的焦距为 25.4 mm, 光阑直径为 50  $\mu\text{m}$ , 透镜 2 的焦距为 1 000 mm, 光阑置于透镜 1 的像方焦点和透镜 2 的物方焦点处, 劳埃德式干涉光刻的主要部件如图 5 所示.

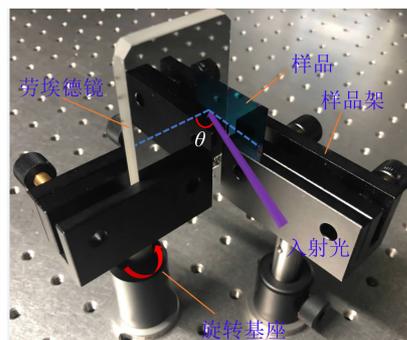


图 5 劳埃德式紫外激光干涉装置实物图

激光出射后, 经过图 5 中系列光学元件, 在样品上发生干涉, 采用光刻胶记录干涉图样.

### 2.2 实验样品

实验中使用的光刻胶是德国 ALLRESIST 公司(型号为 AR-P-3740)的正性光刻胶, 分辨率为 0.4  $\mu\text{m}$ , 适合亚微米的光栅制造. 为掌握不同样品的制备要点及用途, 将分别制备以下样品.

样品 A: 样品架与劳埃德镜严格垂直, 样品衬底为单晶硅, 尺寸为 20 mm  $\times$  20 mm  $\times$  375  $\mu\text{m}$ , 光刻胶厚度为 350 nm. 调整入射角度  $\theta \approx 5^\circ$ , 进行 1 次曝光, 制备一维大周期光栅结构.

样品 B: 条件与样品 A 时相同, 通过调整入射角度  $\theta \approx 20^\circ$ , 进行 1 次曝光, 制备一维小周期光栅结构.

样品 C: 条件与样品 A 时相同, 通过调整入射角度  $\theta \approx 10^\circ$ , 进行 2 次曝光, 制备二维点阵结构.

### 2.3 实验内容

本实验内容分为 2 部分: 基础实验和拓展实验, 面向不同教学需求开展分层次教学, 促进学生综合实验实践能力以及分析和解决问题能力的提升.

基础实验部分需完成样品 A 和样品 B 的制备, 并进行光学显微镜下的结构表征, 该部分内容主要面向本科生. 教师讲授实验原理与操作方法(1 学时), 学生在专职实验技术员的指导下进行一维周期光栅的制备与光镜表征(3 学时). 学生可基于实验操作与样品表征, 掌握劳埃德式紫外

激光干涉光刻技术的基本原理和操作方法,得到并分析光栅周期与波长、入射角度之间的关系,熟练掌握该实验的基本内容。

拓展实验包括2部分,分别为:制备设计和前沿拓展。针对学有余力的本科生和有相关科研需求的研究生,选取不同部分进行实验及后续科研工作。内容包括:

a. 制备设计部分主要完成样品C的制备与表征。学生通过对比实验分析不同曝光剂量、入射角度、偏振方向等对样品光栅点阵周期和光刻质量的影响,获得不同品质及周期的光栅点阵。

b. 前沿拓展部分,学生需根据科研需求利用热蒸发等方法进一步开展金属SP腔的制备,获得不同局域共振波长的金属SP腔。根据本科生、研究生的不同科研需求,可以与低维材料等相结合,通过调节光刻参量获得不同共振波长的金属SP腔,深入探索光与物质强耦合相互作用在物态调控中的重要作用,有助于学生站在前沿科学的角度,体会激光光刻技术在微结构加工实践中的重要作用。

## 2.4 实验过程

### 1) 激光器预热

a. 检查激光器排风口,保证出口无遮挡、无易燃物。

b. 检查激光器出光口,保持快门开启。

c. 将电源上的钥匙顺时针旋转 $90^\circ$ ,开启激光器,预热30 min后方可使用。

注意:激光器位置已校准,不需移动。

### 2) 制样

a. 利用单晶硅片作为衬底,使用旋涂方法制备光刻胶薄膜,转速为5 000 r/min,匀胶时间为60 s,制备光刻胶厚度为350 nm。

b. 前烘:利用热板对上述样品进行前烘,温度为 $90^\circ\text{C}$ ,时间为60 s。

### 3) 激光干涉光刻曝光

a. 将样品平行置于样品架上,固定好劳埃德镜和样品架的位置,保证二者严格垂直。

b. 针对样品A和B:关闭快门,开始曝光,曝光时间为45 s,之后打开快门。

b'. 针对样品C:关闭快门,开始曝光,单次曝光时间应为上述时间的1/2;曝光完毕后,打开快门,将样品旋转 $90^\circ$ ,保持劳埃德镜和样品架位置不变,保证第1次曝光的位置依然在曝光区域,关

闭快门,开始2次曝光,此时的曝光时间依然为制作光栅所用曝光时间的1/2。完成2次曝光后,开启激光器快门。

c. 后烘:利用热板对上述样品进行后烘处理,温度为 $110^\circ\text{C}$ ,时间为60 s。

d. 显影与竖膜:将后烘后的样品浸泡在显影液中60 s,显影液为nmd-3(质量分数为2.38%)与去离子水1:1混合溶液;利用热板对上述样品进行竖膜,温度为 $110^\circ\text{C}$ ,时间为60 s。

主要光刻流程图如图6所示。

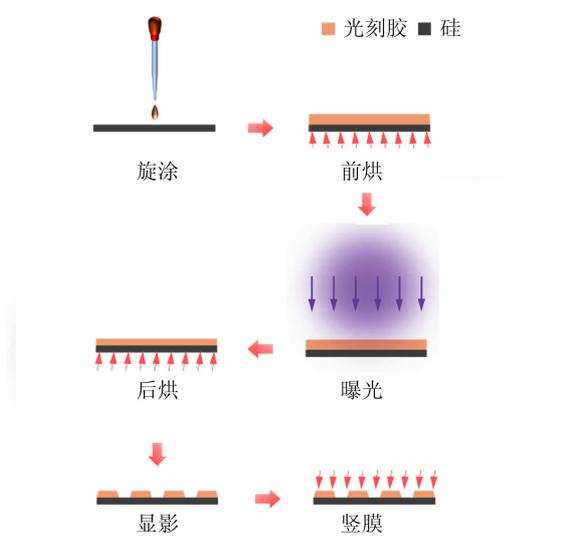


图6 激光干涉光刻流程示意图

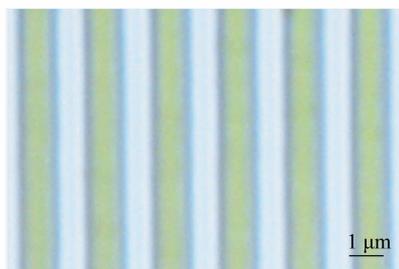
## 3 实验结果分析

### 3.1 基础实验

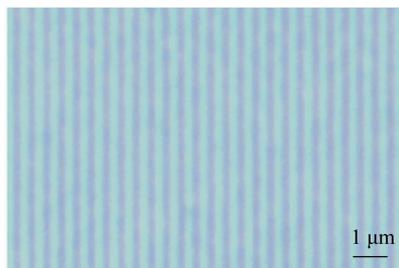
当入射光以 $\theta \approx 5^\circ$ 入射到样品A上时,通过光学显微镜测量,其光栅周期约为2 040 nm,如图7(a)所示;样品B的入射角 $\theta \approx 20^\circ$ ,通过光学显微镜测量,其光栅周期约为506 nm,如图7(b)所示。利用光强分布公式,可以从理论上获得与实验结果一致的干涉光强分布以及光强随位置的变化曲线,如图8(a)~(d)所示。当增加入射角时,光栅周期会减小,当接近衍射极限时,光栅周期将达到极小值。由此可以证明:基于劳埃德式紫外激光干涉法是制备可控微纳米结构的有效方法。

值得说明的是,由于硅衬底具有较高的反射率,在曝光过程中入射光和衬底表面产生的反射光相互干涉可形成驻波。在显影后,光栅的轮廓有起伏,从而降低光栅的质量。一般来说,在光刻

工艺中,驻波效应对薄胶的光刻图形影响较大,而对于厚胶则影响不大. 实验中选择 350 nm 厚度的正性光刻胶,并在光刻工艺中添加后烘工艺处理,从而可以更好地减小驻波的影响.

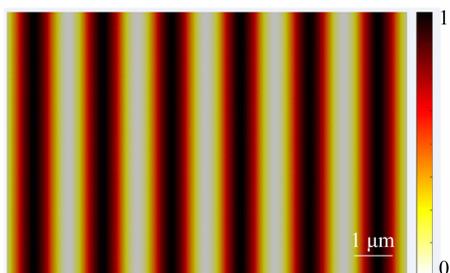


(a) 样品 A

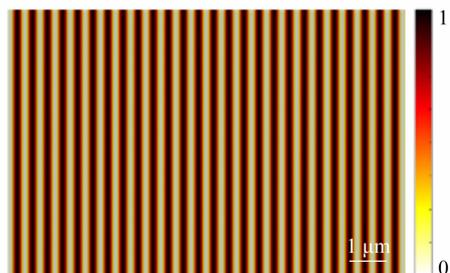


(b) 样品 B

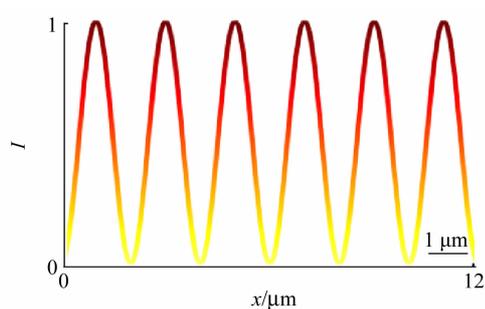
图 7 样品 A 和 B 的实验结果



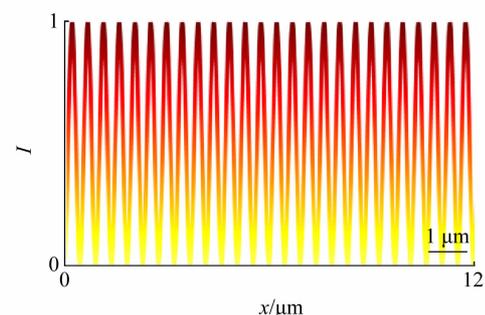
(a) 样品 A 的理论计算光强



(b) 样品 B 的理论计算光强



(c) 样品 A 光强随位置的理论计算变化曲线



(d) 样品 B 光强随位置的理论计算变化曲线

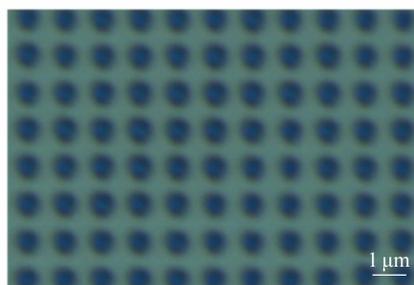
图 8 样品的实验及理论计算结果

### 3.2 拓展实验

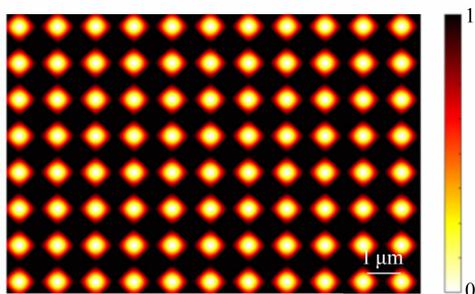
#### 3.2.1 拓展实验一: 制备设计

拓展实验一中有多个参量可供学生选择和制备调控,例如入射角、旋转角、曝光时间、偏振方向等,学生也可设计所需的微纳结构(如二维点阵、准晶结构等). 教师在评定学生实验设计的合理性和可行性后,准备相应的样品供学生测试分析.

以学生选择率最高的样品 C(二维点阵结构)为例,简要说明测试结果. 当样品 C 的入射角  $\theta \approx 10^\circ$ ,通过减半曝光剂量,旋转曝光台,可以获得预期的二维正方点阵结构,如图 9(a)所示,通过光学显微成像,可以发现其结构周期为 1 160 nm,与模拟结果图 9(b)一致.



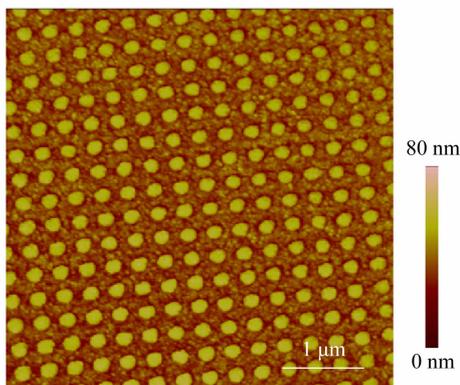
(a) 二维正方格子点阵光学显微镜照片



(b)理论计算的干涉光强分布  
图 9 样品 C 的实验结果与理论计算对比

### 3.2.2 拓展实验二:前沿拓展

针对有专业研究需求的光学与凝聚态专业研究生,可开展前沿拓展实验.基础实验及拓展实验一所制备的一维/二维/准晶格结构是基于单晶硅与光刻胶材料构成的,表现出对光谱的选择性吸收与反射,如果结合热蒸发、磁控溅射等金属膜层制备方法,可以制备金属表面等离极化激元微腔<sup>[11-12]</sup>.这种光学微腔具有可控的光学共振模式及较小的模式体积,在光与物质强耦合领域具有广泛应用.图 10 展示了金属 SP 腔的光学共振模式与微纳结构周期之间的关系<sup>[13]</sup>.



(a)金属 SP 腔的原子力显微镜结果图



(b)不同周期下金属 SP 腔的光学显微镜照片  
图 10 不同周期的金属 SP 腔实验图<sup>[13]</sup>

如图 10(a)的原子力显微镜照片所示,该金属 SP 腔具有金属孔阵结构,当所设计的金属 SP 光学微腔周期结构发生变化时,其对应的光学共振模式发生改变,表现为透过光谱的频移以及颜色的变化,见图 10(b),这将影响光与物质相互作用过程中的耦合强度,产生不同的光与物质强/弱耦合相互作用.利用该模型可以深入理解吸收自感应透明、法诺共振、光与物质强耦合相互作用之间的内在联系<sup>[3]</sup>,有助于学生学习前沿科学领域中光与物质强耦合相互作用及其调控与操纵新奇物态.

## 4 结束语

将基于劳埃德式的激光干涉光刻实验引入物理实验课程,使学生掌握利用光刻技术制备一维光栅的实验技能,并能推广到二维点阵或准晶结构中;基于实验原理、实验操作、样品表征与测量和结果分析等实验教学过程,强化学生对光学、物理化学、固体物理等基础物理知识的深入理解.学生分析讨论一维光栅的周期规律及形貌时,需要结合光的干涉以及光与物质相互作用的相关物理知识.教学中教师注重培养学生多学科交叉的学习能力,以启发式讲授、互动式交流、探究式讨论为主线,形成教学相长的探究式教学模式;基于基础实验与拓展实验的分层次教学设计,特别是向前沿领域的深入挖掘,可充分提高学生的主观能动性,加强学生的实验实践能力,培养学生的科学研究素养与探索精神.

## 参考文献:

- [1] Garcia-Vidal F J, Ciuti C, Ebbesen T W. Manipulating matter by strong coupling to vacuum fields [J]. *Science*, 2021,373(6551):178.
- [2] Zhong X L, Chervy T, Zhang L, et al. Energy transfer between spatially separated entangled molecules [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2017,56(31):9034-9038.
- [3] Li X M, Liu F M, Tian M H, et al. Tunable multi-mode plasmon-exciton coupling for absorption-induced transparency and strong coupling [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2020,124(43):23888-23894.
- [4] Wang S J, Li S L, Chervy T, et al. Coherent coupling of WS<sub>2</sub> monolayers with metallic photonic

- nanostructures at room temperature [J]. *Nano Letters*, 2016,16(7):4368-4374.
- [5] Qin L, Huang Y Q, Xia F, et al. 5 nm Nanogap electrodes and arrays by super-resolution laser lithography [J]. *Nano Letters*, 2020,20(7):4916-4923.
- [6] Majumder A, Masid F, Pollock B, et al. Barrier-free absorbance modulation for super-resolution optical lithography [J]. *Optics Express*, 2015,23(9):12244-12250.
- [7] 赵凯华. 新概念物理教程·光学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2021:76-86.
- [8] 廖怡,秦珠,冯列峰,等. 基础实验试题 C:迈克耳孙干涉仪及其应用[J]. *物理实验*,2021,41(11):20-24.
- [9] 顾长志. 微纳加工及在纳米材料与器件研究中的应用[M]. 2版. 北京:科学出版社,2021:110-123.
- [10] 童利凭,王凤鹏,张玉强,等. 基于数码观测式分光计的劳埃德镜干涉实验[J]. *物理实验*,2022,42(7):29-33.
- [11] Mennucci C, Chowdhury D, Manzato G, et al. Large-area flexible nanostripe electrodes featuring plasmon hybridization engineering [J]. *Nano Research*, 2021,14(3):858-867.
- [12] Balci S, Karabiyik M, Kocabas A, et al. Coupled plasmonic cavities on moire surfaces [J]. *Plasmonics*, 2010,5(4):429-436.
- [13] Zhong X L, Rodrigo S G, Zhang L, et al. Waveguide and plasmonic absorption-induced transparency [J]. *ACS Nano*, 2016,10(4):4570-4578.

## UV-laser interference lithography experiment based on Lloyd mirror

ZHONG Xiaolan, SONG Jiaqi, LI Xiaomiao, YAO Xu, YAN Qiqi, JIN Shuo

(School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The UV-laser interference lithography system was built. The Lloyd mirror was used to generate two-beam wave-front division interference, and the exposure patterns were designed by accurately adjusting and controlling the incident angle of the beam. In the basic experiment, one-dimensional grating could be prepared, and the dependence of grating period on wavelength and incidence angle could be analyzed. In the extended experiment, the preparation of two-dimensional lattice or quasicrystal structure could be completed as the design content, and the surface plasmon polariton microcavity could be prepared as the frontier extension content. UV-laser interference lithography experiment based on Lloyd mirror was convenient to operate and had the good performance of display. It also covered the introduction of optical interference principle and optical path adjustment, the sample preparation and characterization experiments. The comprehensive experiment was helpful for students to master the experimental skills on laser interference lithography.

**Key words:** Lloyd mirror; UV-laser interference; lithography; micro/nano technology

[责任编辑:任德香]