

文章编号 1004-924X(2003)01-0006-05

用亚稳态氦原子束制作纳米结构

陈献忠, 高洪涛, 姚汉民, 陈旭南, 李 展, 石建平, 陈元培

(中国科学院光电技术研究所 微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要: 纳米结构制作是纳米技术的重要组成部分, 原子光刻技术是纳米图形制作的一项新方法。对直流高压放电产生的亚稳态氦原子束进行准直减小其发散角, 亚稳态原子在与之传播方向垂直的激光驻波场中发生淬火并沉积在基底上, 破坏吸附在基底表面的 SAM 膜(self-assembled monolayers), 结合刻蚀技术可制作出纳米量级的图形。给出该技术制作纳米图形的基本原理、方案、相关理论及模拟结果。

关键词: 亚稳态原子; 纳米结构制作; 光驻波淬火

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A

1 引言

纳米技术是 21 世纪的研究热点, 纳米结构制作是纳米技术的重要组成部分, 是纳米器件研制的前提和基础, 制作特征尺寸低于 50 nm 的图形是微细加工技术领域迫切需要解决的难题。光刻系统分辨率的提高可通过增大光刻物镜的数值孔径 NA 和缩短曝光波长 λ 来实现。目前最先进的光刻物镜的数值孔径 NA 已经达到 0.7, 曝光波长已从 g 线(436 nm)、i 线(365 nm) 缩短到深紫外(DUV)的准分子激光 KrF(248 nm) 以及真空紫外(VUV)的 ArF(193 nm)、F₂(157 nm) 等。然而, 波长的减小和数值孔径的进一步增大将使焦深和视场范围迅速缩小, 影响工艺因子, 使高分辨力的优点不能充分利用, 面临着必须克服焦深缩短所带来的问题。因此当图形的特征尺寸小于 100 nm 时, 光学光刻面临很大的挑战。电子束光刻要真正走上产业化和实用化, 其生产效率必须大幅度提高。X 射线和离子束光刻的曝光系统还需深入研究。用亚稳态原子的物质波在抗蚀剂上光刻的思想最初由 Jabez McClelland, Mara Prerrtiss 和 George Whitesides 提出。利用亚稳态原子制作纳米图形具有以下潜在优势^[1-3]: 首先, 中性

原子不带电, 不象电子束、离子束那样受电荷的影响。其次, 原子波是物质波, 波长很短(< 0.01 nm), 衍射效应很小, 因而可以达到原子尺度大小的特征尺寸。第三, 大截面积的原子流容易获得, 大尺寸曝光成为可能。第四, 不需要昂贵的曝光系统, 成本低廉。哈佛大学、斯坦福大学、东京大学在这方面已投入了相当多的人力、物力, 在实验上已获得线宽达 20 nm 的图形^[4]。本文首先介绍用亚稳态惰性气体原子制作纳米图形的原理、实验方案和相关理论, 用 Monte_Carlo 方法从薛定谔方程出发求解波函数, 给出淬火过程中亚稳态原子密度分布的模拟结果。

2 基本原理

利用亚稳态惰性气体原子进行原子光刻的基本原理是利用光抽运作用使原子束产生空间强度分布, 然后将原子束按一定规律使基板上的特殊膜层“曝光”, 结合刻蚀技术在基底上形成纳米量级的条纹、点阵或人们所需的特定图案。如图 1 所示。利用激光技术, 使原子从亚稳态向高能态激发, 处于高能态的原子自发激发回到基态, 该过程称为淬火过程。与淬火过程相关的能级如图 2 所示。

收稿日期: 2002-10-17; 修订日期: 2002-12-25.

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(A2K0009)和微细加工光学技术国家重点实验室开放基金课题资助(KFS4)

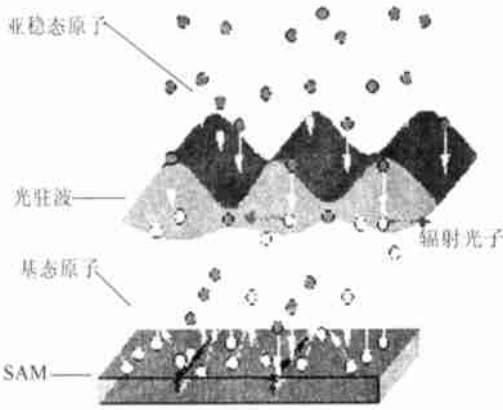


图 1 光驻波操纵亚稳态原子破坏抗蚀剂

Fig. 1 Resist damaged based on the manipulation of metastable atoms by light standing wave

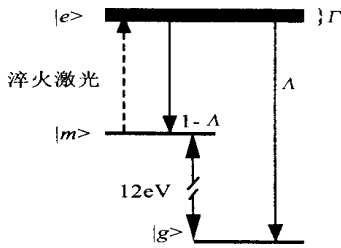


图 2 与淬火相关的能级图

Fig. 2 Energy levels related to quenching

$|m\rangle$ 为亚稳态, 与激发态 $|e\rangle$ 构成二能级系统, $|g\rangle$ 为基态。设以一维横向驻波共振光场激励该二能级系统的跃迁, 光强较强, 最大值远高于饱和强度, 驻波场的场强空间分布使亚稳原子产生跃迁的 Rabi 频率的空间分布 $\Omega(z)$, $|e\rangle$ 态原子通过自发辐射有 Λ 的概率回到 $|g\rangle$ 态或以 $1-\Lambda$ 的概率回到 $|m\rangle$ 态, 当共振光场强度变化时, 进入 $|g\rangle$ 态的速率按 $\Omega(z)/\Gamma$ (Γ 为激发态的辐射衰减系数) 的因子变化。显然, 亚稳原子一旦进入 $|g\rangle$ 态即发生淬灭, 不再成为亚稳态原子。根据这一原理, 亚稳原子束经过一维横向驻波场时将发生空间选择性淬灭, 驻波场的作用就象一系列间隔为半波长的“虚狭缝”, 只有通过驻波波节处的原子才能保持其亚稳状态。与金属光刻情形相同, 也只有横向速度足够小的亚稳原子才能被保持在节点附近。因而驻波场可视为对原子内能和横向速度的选择器。处于亚稳态的原子所携带的能量一般不会释放, 除非有外界扰动出

现, 例如原子与表面碰撞将释放此能量。亚稳态 $|m\rangle$ 比基态 $|g\rangle$ 能量高出 12 eV, 正是利用这个能量的差别实行刻印, 方法是采用一种特殊的带有单分子涂层的基板, 基板材料为硅, 表面依次镀有 Cr 和 Au 的薄层, 最后再涂以 SAM 膜 (self-assembling monolayer), 当具有横向周期结构的 Ar^* 原子束打在基板上时, SAM 膜将被破坏, “曝光”后再将基板进行显影和化学腐蚀, 将 Au 层刻印成纳米级光栅如果在接触表面涂上抗蚀剂, 该能量将损坏抗蚀剂。

3 实验方案

试验装置如图 3 所示, 亚稳态原子由直流高压放电产生, 原子流穿过漏勺后再穿过直流偏转电场, 除掉其中的电子和正离子, 否则会严重影响实验。亚稳态原子流通过一准直孔减小发散角, 若要进一步准直, 可以再加一横向偏振梯度场。发散角近似为零的原子流在与之传播方向垂直的激光驻波场中发生淬灭, 形成周期性密度分布破坏抗蚀剂。这种方法是用光驻波场操纵原子使原子束成型, 因而驻波场可以看成光掩模^[5,6]。当然也可以用材料掩模使原子束成型, 其原理如图 4 所示。但不依靠支撑物的材料掩模可能会阻塞原子, 同时为了减小粒子在自由飞行时的扩散, 掩模必须紧靠在基底表面。而且在纳米结构制作过程中掩模的机械结构稳定性必须非常好。

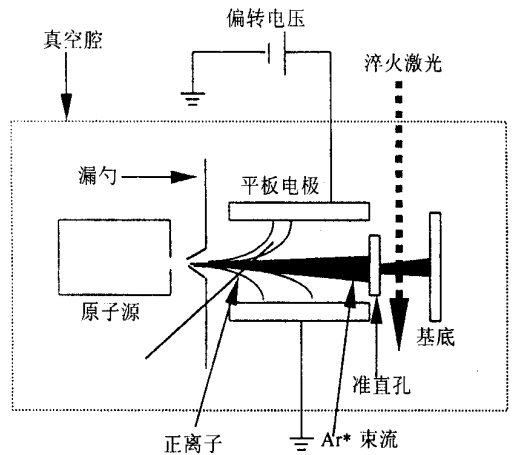


图 3 实验装置原理图

Fig. 3 Principle of experimental setup

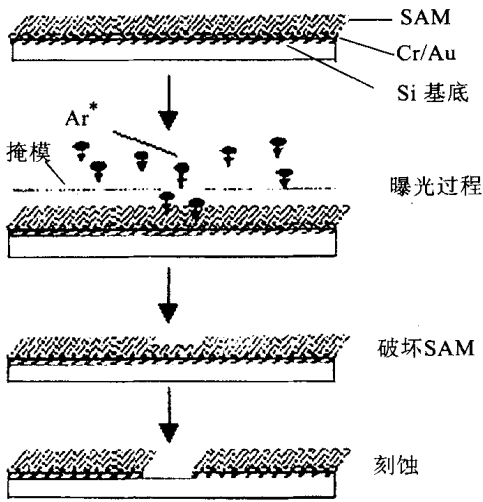


图 4 基于物理掩模的实验步骤

Fig. 4 Experimental procedures based on physical mask

4 相关理论

假设原子的纵向速度 V_z 恒定, 由于即使是很慢的原子, 其动量都很大, 偶极力不足以改变纵向运动, 因此纵向位置可简单地表示为: $z = v_z t$ 。可以仅考虑原子的横向运动随时间的变化。结合纵向运动一维与时间有关的几率密度 $|\Psi(x, t)|^2$ 可以转化为二维静态几率密度 $|\Psi(x, z)|^2$ 。该方法可以大大减小运算的复杂程度, 方便求解。在激光的驱动下, 亚稳态和激发态之间可以实现跃迁。原子从激发态可以回到基态或亚稳态, 设几率之比为 0.66: 0.33。回到基态的原子不受激光影响, 可以不考虑在内, 因而问题变为简单的二能级系统。自激发是淬火实验的关键, 通常要求解密度矩阵方程或利用蒙特卡罗模拟。

具有高斯剖面的两相向传播的激光形成驻波场, 激光光腰为 w , 单束功率为 p 。光场分布为:

$$I(x, z) = I_{\max} e^{-2z^2/w^2} \sin^2(kx), \quad (1)$$

其中: $I_{\max} = 8p/(\pi w^2)$ 为强度最大值, $k = 2\pi/\lambda$ 。在激发态 $(1, 0)$ 和亚稳态 $(0, 1)$ 的基础上, 哈密顿

算子的势能部分为:

$$\hat{V}(x, z) = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} -\delta & \Omega(x, z) \\ \Omega(x, z) & \delta \end{pmatrix} - \frac{\hbar}{2} i\Gamma\Lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中: δ 是激光的调谐量, $\Omega(x, z)$ 为拉比频率, 第二项反映了激发态的衰减。拉比频率为

$$\Omega(x, z) = \Gamma \sqrt{I(x, z)/2I_0}, \quad I_0 = \frac{2}{3} \frac{\hbar\pi^2 c}{\tau\lambda^3}$$

$$\tau = \frac{1}{\Gamma}, \quad z = vt. \quad (3)$$

5 模拟结果及分析

用 Monte_Carlo 方法从薛定鄂方程出发来求解波函数^[7], 根据自发散射率在随机时间引入量子跳跃干扰这种演变。图 5 是亚稳态原子在淬火前的密度分布和淬火后的密度分布对比, 从中可以看出原子的密度分布呈现“沟道化”效应。图 6 中的 (a) 图是淬火过程中原子的密度分布沿传播方向的变化, (b) 图是当光频率的失谐量很大没有淬火现象发生时原子密度的变化情况。

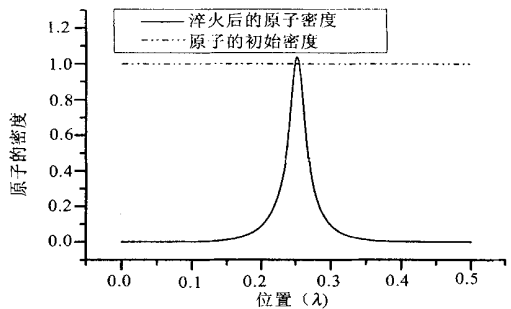


图 5 淬火前后的原子密度对比

Fig. 5 Comparison between initial atomic density and density after quenching

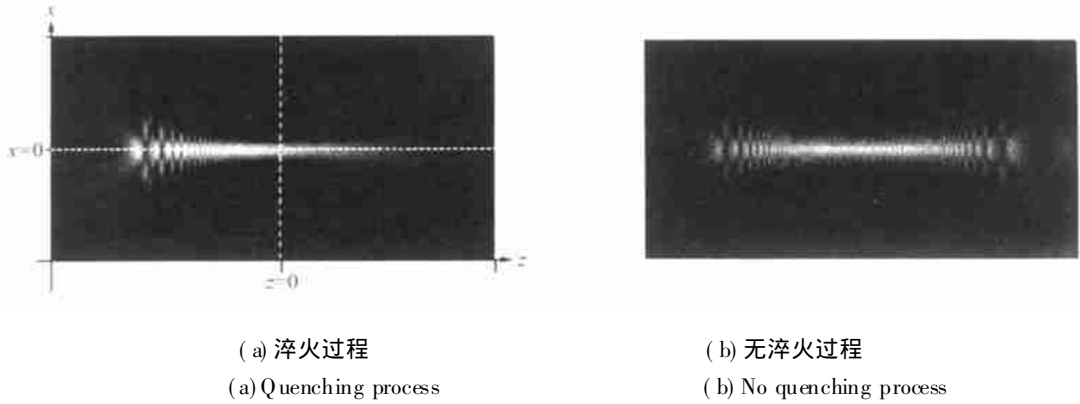


图 6 淬火过程和无淬火过程中原子密度的分布对比(亮度高的地方表明密度大)

Fig. 6 Comparison of atomic density distribution with and without quenching(High lightness stands for large density)

本文对用亚稳态氩原子制作纳米结构进行了分析, 该理论同样适用于其它亚稳态原子。如亚稳态稀有气体 He、Ne、Kr 都具激光淬火的性质,

即在激光辐照下从亚稳态转移到基态。其淬火跃迁所需要的波段在近红外区域, 现有激光器可方便实现。

参考文献:

- [1] REHSE S J, GLUECK A D, LEE S A, *et al.* Nanolithography with metastable neon atoms: Enhanced rate of contamination resist formation for nanostructure fabrication[J]. *J Appl Phys Lett*, 1997, 71(10): 1427_1429.
- [2] JOHNSON K S, BERGGREN K K, BLACK A, *et al.* Using neutral metastable argon atoms and contamination lithography to form nanostructure in silicon, silicon dioxide, and gold[J]. *J Appl Phys Lett*, 1996, 69(18): 2773_2775.
- [3] CHU A P, JOHNSON K S, PRENTISS M G. A virtual amplitude grating for atomic optics[J]. *Opt Commun*, 1997, 134: 105_111.
- [4] THY WISSEN J H, JOHNSON K S, DEKKER N H, *et al.* Metastable atom activated growth of an ultrathin carbonaceous resist for reactive ion etching of SiO₂ and Si₃N₄[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1998, 16(3): 1155_1160.
- [5] MCCLELLAND J J, SCHOLTEN R E, PALM C, *et al.* Laser focused atomic deposition[J]. *Science*, 1993, 262(5135): 877_880.
- [6] MCGOWAN R W, GILTNER D M, LEE S A. Light force cooling, focusing, and nanometer scale deposition of aluminum atoms[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(24): 2535_2537.
- [7] 罗先刚. 原子光刻技术探索研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2001.
LUO X G. Study on atom lithography, doctoral dissertation[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences. Chengdu, 2001. (in Chinese)

Using metastable argon atomic beam to fabricate nanostructures

CHEN Xian_zhong, GAO Hong_tao, YAO Han_min, CHEN Xu_nan, LI Zhan, SHI Jian_ping, CHEN Yuan_pei

(*State Key Lab of Optical Technologies for Microfabrication,
Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

Abstract: Fabrication of nanostructures is an important part of nanotechnology, and atom lithography technology is a new nanostructure fabrication method. A metastable argon atomic beam generated by high_volt-age discharge is collimated to minimize the divergence angle of atomic beam. Metastable atoms are quenched when well_collimated beam travels through the light standing wave perpendicular to the propagation direc-tion of the atomic beam, and then deposited onto the substrate. SAM absorbed on substrate surface is dam-aged by metastable atoms, and the nanometer_scale structure can be fabricated with etching technologies. The basic principle, experimental schemes, correlative theory of this technique and simulation results are giv-en.

Key words: metastable argon atom; fabrication of nanostructures; light standing wave quenching

作者简介: 陈献忠(1974-), 男, 山东省费县人, 博士生, 从事纳米加工技术研究和微电子光刻研究。

征订启示

《光机电信息》(月刊)

—— 一本为您提供信息服务的独特专业杂志

《光机电信息》是一份为工程师、研究者、科学家和技术专家提供国内外有关光学、光电子学和精密机械综合消息的月刊。它从技术和商业两方面报道和分析上述领域的最新研究进展和发展趋势, 其特点是信息量大且传播速度快。

完整的报道范围

《光机电信息》以全方位的视角瞄准国际前沿, 紧盯国内外光机电领域发展的热点和焦点, 每期以专题形式发布。主要报道光学、光电子学、光电工程、精密机械、激光、光通信、光学仪器、发光学、显示技术、医用光学、光学材料、微纳技术、微机械系统(MEMS)、先进加工制造技术等诸多读者感兴趣的领域。

有效的报道内容

《光机电信息》是国内致力于光电子领域的工程师、管理人员、科学家、研究者和技术专家的必读之物。《光机电信息》每月都会向其服务的产业提供以下栏目: 各种专题报道、市场纵横、科技简讯、产品放送、设计与应用和专题信息长廊等。

广告投资的最好选择

《光机电信息》是一份每月发行量达 5000 余份的资深杂志, 这意味着每年有数 10 万人次的顶级工程师和研究人员阅读《光机电信息》。您的广告会被所有《光机电信息》的读者看到。请抓住机遇, 扩大贵公司在中国市场的知名度。

欲投放广告于《光机电信息》 请按下列地址联系

联系人: 高晓萍

传 真: (0431) 5682346

地 址: 长春市人民大街 140 号

电 话: (0431) 5361590

邮 编: 130022

E mail: xxfw@ciomp.ac.cn