

激光驻波场形成 Cr 原子沉积纳米光栅 的初步实验研究*

马 艳 张宝武 郑春兰 马珊珊 李佛生 王占山 李同保†

(同济大学物理系, 上海 200092)

(2006 年 4 月 6 日收到, 2006 年 6 月 22 日收到修改稿)

利用激光驻波场会聚原子沉积纳米结构的技术可以用来研制纳米结构长度传递标准. 当激光驻波场的频率大于原子的共振频率时, 原子由于受到偶极力的作用将被会聚到驻波的波节处. 采用了一种新的技术方案减小了实验对大的激光功率的要求. 利用激光驻波场会聚准直性较好的 Cr 原子, 并使其沉积在硅基片上形成纳米光栅结构. 经原子力显微镜测试表明纳米光栅的周期为 215 nm.

关键词: 激光偶极力, 纳米计量, 原子沉积, 蓝失谐

PACC: 3280P, 3380P, 4250V

1. 引 言

纳米科技研究的是 0.1—100 nm 尺度范围的物质世界, 目标是操纵原子和分子并直接用原子和分子制造具有特定功能的产品^[1]. 纳米计量涉及在这个尺度范围内测量对象的间隔或位移并表征物体及其表面形貌特征. 各种纳米级科学测量仪器, 特别是作为纳米科技主要测量和操作工具的原子力显微镜 (AFM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 等, 由于受仪器工作原理、测量对象和环境因素影响, 用不同仪器检测同一标样, 或用同一仪器在不同环境下测量同一标样, 结果可能截然不同. 因此, 研制准确适用的纳米计量传递标准是纳米科技中的关键问题^[1]. 激光驻波场会聚原子的方法是一种新型的制作纳米结构传递标准的技术. 利用这种方法研制的纳米计量标准的相对不确定度为 10^{-5} , 可以直接溯源于绝对原子跃迁频率. 因此制作出来的纳米光栅结构也是很精确的, 合乎作为纳米传递标准的要求^[2,3].

1992 年, Prentiss 等人用实验验证了激光驻波场操纵原子沉积这一理论预言^[4]. 他们让 Na 原子束通过激光束后在沉积图案中观察到了激光光束的阴影. 同年, Timp 等人报道了利用激光会聚 Na 原子

沉积纳米光栅结构的实验^[5]. 光栅的周期为激光波长的一半. 但是, 由于 Na 原子在空气中的化学不稳定性使得沉积的纳米结构无法在真空室以外的环境下存在. 因此, 科学家们逐渐开始了对其他化学性能更加稳定的原子的研究. 1993 年, McClelland 等人用同样方法获得了 Cr 的一维栅结构^[2,3,6]. 1996 年, McGowan 等人用 AL 也作出了同样的光栅结构^[7]. 2004 年, Sligte 等人研制出了 Fe 原子的纳米结构^[8]. 国内已有单位进行相应的理论工作^[9-11]. 除理论研究外^[12,13]我们开展了这方面的实验研究, 并研制出了初步的实验样品.

2. 工作原理

原子与高斯型激光驻波场相互作用时, 所受的力可以由下式表示^[14]:

$$F = \frac{\hbar k p}{1+p} \Delta \tan(kx) \times \left[1 + v_x k \frac{\Gamma^2(1-p) - 2p^2(\Delta^2 + \Gamma^2/4)}{\Gamma(\Delta^2 + \Gamma^2/4)(1+p)} \times \tan(kx) \right], \quad (1)$$

其中, $p = \Gamma^2 I / I_s (\Gamma^2/4 + \Delta^2)$. \hbar 为普朗克常数的 $1/2\pi$, k 为激光的波数, v_x 表示原子在 x 方向的运动

* 上海市纳米技术专项基金(批准号 0259nm034, 0452nm029)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: mayan@mail.tongji.edu.cn

速度, Γ 为原子跃迁的自然线宽, Δ 表示激光频率与原子共振频率的失谐量. I_s 为原子的饱和光强. 上式可分为两项, 一项是与速度无关的, 称为偶极力, 来自原子的极化, 在光强不均匀的驻波场中, 其方向沿着光场梯度, 可以用来会聚原子; 另一项是与速度有关的, 称为自发辐射力, 可以用来冷却原子的速度. 当失谐量 Δ 远远大于 Γ 时, 自发辐射力可以被忽略, 此时起主要贡献的是偶极力.

图 1 表示了激光驻波场会聚原子的原理图. 当被横向准直后的原子在激光驻波场 ($\Delta \gg \Gamma$) 中运动时, 将受到偶极力的作用而改变运动轨迹. 一束激光 ($\Delta \gg \Gamma$) 经逆向反射形成驻波, 从而建立了一系列相互平行的偶极力势阱, 势阱的间距为 $\lambda/2$. 当激光频率失谐量 $\Delta > 0$ ($\Delta < 0$) 时, 势阱的最低点位于驻波波节(波腹)处, 原子受到的力朝向阱底(外), 受该力的作用原子将被会聚到驻波波节(波腹)处, 进而沉积在基片表面形成纳米光栅结构, 光栅结构的周

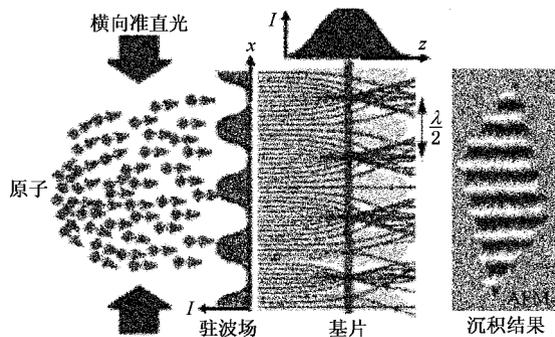


图 1 激光驻波场会聚原子的原理图

期为 $\lambda/2$. 激光驻波场对原子的会聚现象类似于光学透镜对光线的会聚现象. 因此, 激光驻波场又被称为原子透镜. 由于原子在蓝失谐激光驻波场中运动时, 原子会被会聚在驻波势阱的波节处, 即激光强度

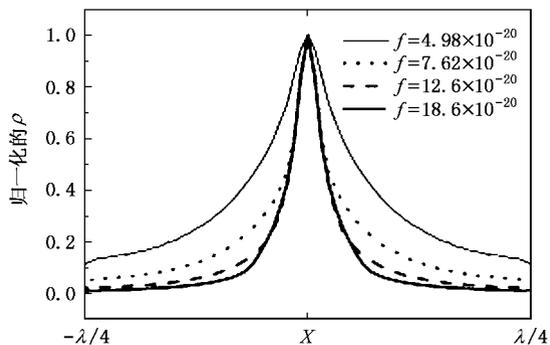


图 2 偶极力对沉积结果的影响

最弱的地方, 这将大大地减少高的激光功率引起的热效应对沉积结果的影响. 图 2 为偶极力对沉积结果的影响, 图中横坐标表示沉积条纹的半高宽度, 纵坐标表示条纹的对比度, 由图可以看出随着偶极力的增加, 沉积条纹的半宽度变窄, 也就是说沉积效果变好.

3. 激光驻波场会聚原子的必备条件

3.1. 准直性好的原子束

Cr 属于自保护型金属, 与基片的黏附力大, 在空气中结构稳定, 同时 ^{52}Cr 在自然界中的丰度为 84%, 所以我们选用了 ^{52}Cr 作为沉积物质. 在这个实验中我们选用 Cr 原子的跃迁线为 $^7\text{S}_3 \rightarrow ^7\text{P}_4$, 对应的共振波长为 425.55 nm (真空), 自然线宽为 $\Gamma = 5$ MHz. Cr 原子源由 Cr 炉提供, 它是通过辐射加热输出孔径为 1 mm 的坩埚产生的(德国 CreaTec Fischer 公司提供的型号为 HTC-40-10 商用高温 Cr 原子蒸发炉), 实验中采用的工作温度为 1650°C.

图 3 为原子的横向准直效果(原子的横向温度)对沉积效果的影响^[12]. 图中横坐标表示原子被横向冷却后的角度, 纵坐标表示条纹半高宽. 线条越窄是好的沉积效果特征. 因此, Cr 原子在与会聚驻波场相互作用之前, 必须先进行横向激光准直.

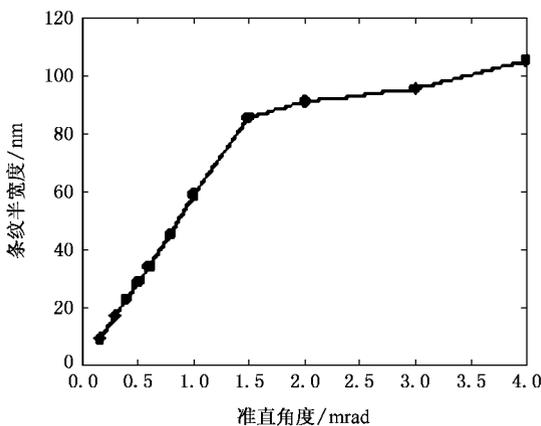


图 3 原子的横向准直效果对沉积效果的影响

实验中我们采用多普勒冷却机理对 Cr 原子束横向准直, 实验装置同文献[15]. Cr 原子束离开准直激光束后, 又自由运动 660 mm 的距离, 并在此处与探测光束相互作用产生荧光. 利用 CCD 拍摄此处的荧光光斑. 图 4(a)与(b)分别为准直前与准直后

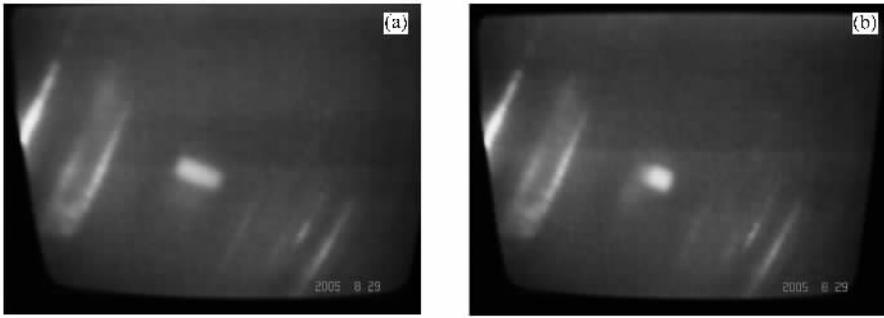


图 4 激光准直前后荧光图像 (a)为准直前荧光光斑 (b)为准直后荧光光斑

的荧光光斑图,可以得出激光准直后原子的横向尺寸压缩到原来的 1/3.

3.2. 频率稳定的激光驻波场

为提供 425 nm 波长的光源我们选用下面组合的激光器:利用 LD 抽运 532 nm 的内腔倍频激光器 (Verdi-10,coherent)作为连续可调谐钛宝石激光器 (MBR-110,coherent)的抽运源.其中,532 nm 激光器的最大输出功率 10 W,实际工作中设定在 8 W,此时得到钛宝石激光器的输出功率为 1.25 W,并且把它的输出光的波长调谐在 851 nm.然后把钛宝石激光器的输出光耦合到外腔倍频激光器(MBD-200,coherent)中产生 425.55 nm 的输出,功率为 200 mW.

激光频率的稳定性会影响激光准直与激光会聚光束失谐量的变化,从而影响准直效果与沉积结果.激光会聚原子要求激光驻波场的频率稳定性必须小于原子的自然线宽,而以上提供的光源的稳定性远远不能满足我们的要求.因此,我们采用感生荧光法

稳定激光的频率^[15].加稳频措施后,激光的频率稳定性优于 0.28 MHz.

4. 实验装置

图 5 为激光会聚 Cr 原子的实验示意图.图中虚线方框内表示真空室.图中 Verdi10 为产生 532 nm 激光的激光器,MBR110 为钛宝石激光器,MBD200 为产生 425 nm 激光的倍频器, M_1 -851 nm 减反镜,WA-波长计(用于监视激光器的频率), $\lambda/2$ -半波片,PBS1,PBS2-偏振分束棱镜, $M_2,M_4,M_5,M_6,M_7,M_8,M_9$ -425 nm(45°)高反镜, L_1,L_2 -透镜,AOM-声光调制器,Cr 炉-提供 Cr 原子源,PC-预准直孔(限制原子的发散角),SPD-Split-photodiode,DFA-差分放大器,ZL₁ZL₂-柱面透镜,CCD-CCD 摄像机(用于探测荧光), M_3 -425 nm(0°)高反镜(用于反射准直激光束和会聚光束形成准直区和驻波场),S-基片(用于沉

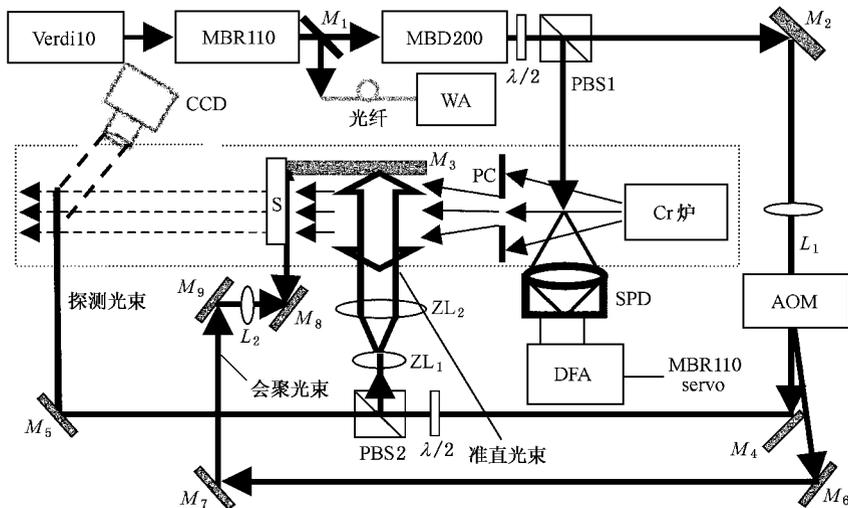


图 5 激光会聚 Cr 原子沉积纳米结构的实验示意图

积纳米光栅结构)。

为了得到好的准直效果,准直激光的频率需要设定在偏离 Cr 原子共振频率 -5 MHz 的位置,而大的失谐量通常会得到好的沉积效果^[14],实验中我们把会聚光的频率设定在偏离 Cr 原子共振频率 $+250$ MHz(蓝失谐)。通常的实验方案:1)把激光的频率稳定在原子跃迁线上,在准直光束或会聚束上分别加一个声光调制(AOM)偏频;2)把激光的频率稳定在其中一束光的频率上,而在另外一束光上加声光调制器。这样做的缺点是从声光调制器输出的 0 级光就会被浪费,这样对总的激光功率要求很高。所以,本文采用了一种新的方案可以大大减小实验对激光器总功率的要求。首先,利用激光感生荧光稳频技术把激光的频率稳定在偏离所需共振频率 -5 MHz 的位置上(即准直光的频率上)^[15]。从倍频器输出的 425 nm 的激光被半波片与 PBS1 分成两束,其中 3 mW 的光用于稳定激光器的频率,其余的被焦距为 200 mm 的透镜 L_1 聚焦后通过 AOM。从 AOM 输出的 0 级光用来准直原子和探测荧光(用于监视准直效果),+1 级光用来形成驻波场沉积纳米结构,+1 级与 0 级光频率相差 250 MHz。准直光的功率 60 mW,探测光功率 1 mW,会聚光功率 40 mW。开始不装基片,先通过扫描激光频率把准直效果调到最佳状态^[15],并把激光器的频率锁定在此处。第二步,装基片。为了使基片与形成驻波场反射镜 M_3 的垂直度在 ± 0.1 mrad 以内,我们基片与反射镜 M_3 装在一块直角棱镜的两个直角面上。第三步,通过焦距为 350 mm 的透镜 L_2 把会聚光束聚焦为束腰半径为 100 μm 左右的光束,并使其光腰位置正好在反射镜 M_3 上,基片的位置调整到可以挡住会聚光束的一半,使另外一半光束掠过基片,高斯强度分布的极大值刚好位于基片表面。会聚光束入射到 M_3 上并且被 M_3 原路返回,形成会聚原子的驻波场。由图可以看出准直光与会聚光都经同一块反射镜 M_3 反射,所以可以保证准直束与会聚光束的平行度不大于 1 mrad,并且可以保证驻波场与原子的垂直度 < 1 mrad。

5. 实验结果及结果分析

经过 1 h 的沉积后,我们把样品从真空室中取出并用 AFM 测量沉积结果。图 6 为利用韩国 PSIA 公司生产的 XE-100 型 AFM 测量的激光会聚 Cr 的

纳米结构沉积结果。图中可以看出比较明显的纳米结构 Cr 原子沉积线(沉积线的方向与横坐标平行)。本图片总的测量范围为 5 $\mu\text{m} \times 5$ μm 。由 AFM 的测量结果得出两条纳米线之间的间距为 215 nm(而理论值应该是 212 nm)。估计测量的纳米线的间距偏离理论值的原因可能是因为:1)测的纳米线较粗,导致了测量误差;2)测量仪器 AFM 本身精度较差。从图中可以看出整个图面颜色分布不太均匀,这表示 AFM 测量到了高度不同的点,颜色越深,点的高度越低,我们怀疑这是由于 Cr 原子源的不均匀喷发造成的,在今后的工作中要采取有效措施加以改进。

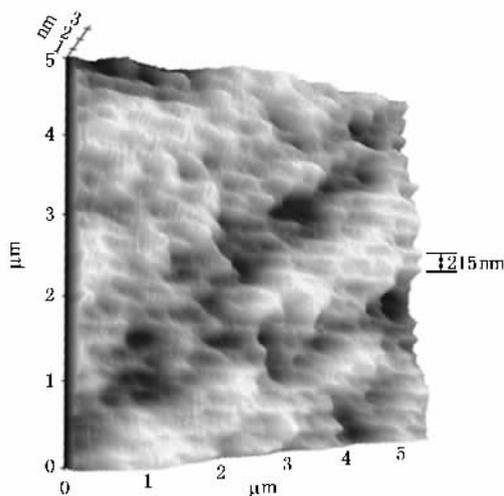


图 6 利用 AFM 测量的纳米结构光栅样品

为了在下一步的工作中得到好的实验结果,我们从理论上分析了实验中的几个关键参数对沉积效果的影响^[12,13]。由理论分析的结果表明会聚激光的失谐量、会聚激光的功率、原子的准直效果、会聚激光束的腰斑半径、会聚光束中心位置与基片之间的距离都对沉积结果有很大的影响。因此,下面的工作中我们会根据理论计算的结果优化实验结果,得到具有清晰纳米光栅结构的样品。

6. 结 论

文中介绍了利用激光会聚原子的方法得到了纳米光栅结构长度传递标准的初步样品。文中利用了一种新的实验方案,减小了系统对激光总功率的要求。文中得到的纳米样品的周期为 215 nm。最后,根据理论分析的结果提出了对今后的工作改进方向。

- [1] Mekeown P A 1998 *Proceedings of Symposium on Nano-metrology in Precision Engineering*(Hong Kong)p5
- [2] McClelland J J , Anderson W R , Bradley C C *et al* 2003 *Nati. Inst. Standards & Technol.* **108** 99
- [3] Gupta R , McClelland J J , Marte P , Celotta R 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4689
- [4] Prentiss M , Timp G , Bigelow N *et al* 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 1027
- [5] Timp G L , Behrenger R L , Tennant D M *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 1636
- [6] McClelland J J , Scholten R E , Palm E C *et al* 1993 *Science* **262** 877
- [7] McGowan R W , Giltner D M , Lee S A *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 2535
- [8] Slight E T , Smeets B , Van der Stam K M R *et al* 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4493
- [9] Chen Y P , Li Z , Chen X Z *et al* 2001 *J. Optoelectronics · Laser.* **12** 1193 (in Chinese) [陈元培、李 展、陈献忠等 2001 光电子·激光 **12** 1193]
- [10] Chen X Z , Yao H M , Chen X N 2004 *Chines Optics letters* **2** 187
- [11] Chen X Z , Yao H M , Chen X N 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2645 (in Chinese) [陈献忠、姚汉民、陈旭南 2005 物理学报 **54** 2645]
- [12] Ma B , Ma Y , Zhao M , *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 667 (in Chinese) [马 彬、马 艳、赵 敏等 2006 物理学报 **55** 667]
- [13] Zheng C L , Li T B , Ma Y *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4528 (in Chinese) [郑春兰、李同保、马 艳等 2006 物理学报 **55** 4528]
- [14] Berggren K K , Prentiss M , Timp G *et al* 1994 *J. Opt. Soc. Am. B* **11** 1166
- [15] Ma Y , Zhang B W , Zheng C L *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4086 (in Chinese) [马 艳、张宝武、郑春兰等 2006 物理学报 **55** 4086]

The preliminary result of laser- focused Cr atomic deposition for fabricating nanostructure^{*}

Ma Yan Zhang Bao-Wu Zheng Cun-Lan MA Shan-Shan Li Fo-Sheng Wang Zhan-Shan Li Tong-Bao[†]

(Department of Physics , Tongji University , Shanghai 200092 , China)

(Received 6 April 2006 ; revised manuscript received 22 June 2006)

Abstract

The technology of laser-focused atomic deposition can be used to develop the nanostructure transfer standard of length. When the frequency of laser standing wave is higher than the resonant frequency of atoms , the atoms will be focused on the wave node of the standing wave. The collimated Cr atoms are focused by a standing-wave laser field as they are deposited on a silicon substrate. Atomic force microscopy measurements shows a spacing of 215nm.

Keywords : laser dipole force , nanometrology , atoms deposition , blue detuning

PACC : 3280P , 3380P , 4250V

^{*} Project supported by the Shanghai Nanoscience Foundation(Grant Nos.0259nm034 ,0452nm029).

[†] Corresponding author. E-mail : mayan@mail.tongji.edu.cn