

## 原子光刻中驻波场与基片距离的判定方法研究\*

王建波<sup>1)†</sup> 钱进<sup>1)</sup> 殷聪<sup>1)</sup> 石春英<sup>1)</sup> 雷鸣<sup>2)</sup>

1) (中国计量科学研究院长度所, 北京 100013)

2) (中国国防科技信息中心, 北京 100036)

(2012年1月10日收到; 2012年3月22日收到修改稿)

原子光刻实验中, 激光驻波场能起到原子透镜的效果, 实现原子汇聚. 激光驻波场与沉积基片间的距离对形成纳米条纹结构的质量具有重要影响. 利用高斯光束传播规律, 提出了一种能够定量判断激光驻波场与沉积基片相对位置的实验方法. 该方法通过调节装载有凸透镜和反射镜的精密位移台改变驻波场距基片的距离, 利用光电探测器接收反射光强的变化, 将位移改变量转变为接收器的电压信号. 利用驻波场激光束光斑直径值, 实现准确定位驻波场与基片的距离. 对上述实验过程进行数值模拟, 数值计算的结果和实验结果高度符合. 该方法实现了准确定位驻波场距基片的距离, 为后续深入研究驻波场和基片间距离对沉积纳米条纹结构质量的影响提供实验基础.

**关键词:** 原子光刻, 原子沉积, 一维纳米光栅, 激光驻波场

**PACS:** 06.20.-f, 37.90.+j

## 1 引言

以原子光学为基础的原子光刻技术<sup>[1]</sup>是一种新型纳米结构的加工技术. 采用该技术制作的一维纳米光栅结构的间距可直接溯源于激光波长, 是一种理想的纳米计量传递标准的制作技术<sup>[2]</sup>. 利用该技术已先后对钠原子<sup>[3]</sup>、铬原子<sup>[4,5]</sup>、铝原子<sup>[6]</sup>、镱原子<sup>[7]</sup>和铁原子<sup>[8]</sup>实现了一维纳米光栅结构的制作, 并利用铬原子实现了二维纳米结构的制作<sup>[9,10]</sup>.

运动的原子在激光场受到的力可以概括为自发辐射力和偶极力两部分. 前者主要用于冷却原子的横向速度, 实现原子分布的压缩. 后者则能起到原子透镜的效果, 实现原子汇聚. 假设激光频率与原子跃迁频率的差为失谐量  $\Delta$ , 原子跃迁谱线的自然线宽为  $\Gamma$ . 理论分析表明, 当原子束穿过一个频率失谐量  $\Delta$  的驻波场时, 在偶极力的作用下, 原子会向驻波场的波峰 ( $\Delta \ll -\Gamma$ ) 或波节 ( $\Delta \gg \Gamma$ ) 处汇聚<sup>[11]</sup>.

驻波场到基片之间的距离是影响沉积条纹质量的重要参数. 假设激光的腰斑半径为  $w_0$ , 数值模拟的结果表明, 当激光驻波场光斑中心位于基片表面时, 原子的沉积条纹高度最高, 条纹宽度最窄, 对比度最好. 当基片位于激光驻波场光斑中心后  $0.5w_0$  时, 沉积的纳米条纹高度减半, 宽度加倍. 当基片位于激光驻波场光斑中心前  $0.5w_0$  时, 激光驻波场对原子的汇聚作用将变得十分微弱, 已经很难从沉积的基底中分辨出条纹结构<sup>[12]</sup>. 由此可见, 激光驻波场相对基片的距离对沉积的纳米条纹的质量具有重要影响. 因此, 在原子光刻实验中, 设计一种能够定量判断驻波场相对基片位置的实验装置, 以实现精确定位驻波场与基片的距离, 对深入研究驻波场相对基片距离对纳米条纹结构质量的影响具有重要意义.

本文介绍了一种精确判断驻波场距基片距离的实验方法, 并详细说明了实验装置的各部分功能及作用. 利用实验测得驻波场光束的腰斑半径值作为条件, 对实验过程进行了理论模拟, 数值计算的结果和实验测量结果高度符合. 该方法大大提高了

\* 国家科技支撑计划 (批准号: 2006BAF06B08) 资助的课题.

† E-mail: wjb19860818@163.com

实验的准确性和重复性. 此外, 该方法还在类似的原子光刻实验中都具有有一定的普遍适用性.

## 2 实验装置

原子光刻的实验光路共分为: 稳频光路、冷却光路、驻波场光路、探测光路四个部分. 每部分光路都是由经过柱透镜整形后得到的线偏振光进行分光得到. 本文只就驻波场光路的位置调整做深入讨论. 实验设计的驻波场位置调整装置如图 1 所示. 用于形成驻波场的高斯光束依次经过偏振分光棱镜 PBS,  $\lambda/4$  波片, 光阑 H 后, 被焦距为 350 mm 的凸透镜  $L_1$  聚焦. 聚焦后的激光束经反射镜  $M_1$

进入沉积腔, 垂直作用于 Cr 原子束. 腔内沉积台如图 2 所示, 反射镜  $M_3$  装载在可调节光学镜架上, 棱镜 C 的一直角面粘附于  $M_3$  下部, 基片 B 贴附于棱镜的另一直角面中心. 调整  $M_3$ , 令聚焦后的激光束沿原路返回, 形成驻波场.  $L_1$  和  $M_1$  被装载在能够沿  $z$  轴平移的同一精密平移台上. 调节  $L_1$  的位置改变聚焦后高斯光束的腰斑在  $x$  方向上的位置, 使驻波场激光的束腰与沉积台反射镜  $M_3$  的表面重合. 沿  $z$  方向移动平移台, 则可以保证聚焦后的高斯光束的束腰与  $M_3$  镜面重合的前提下, 使驻波场光束沿  $z$  方向平移, 达到调节驻波场到基片距离的目的. 装载  $L_1$  和  $M_1$  的平移台的最小分辨率为  $10 \mu\text{m}$ .

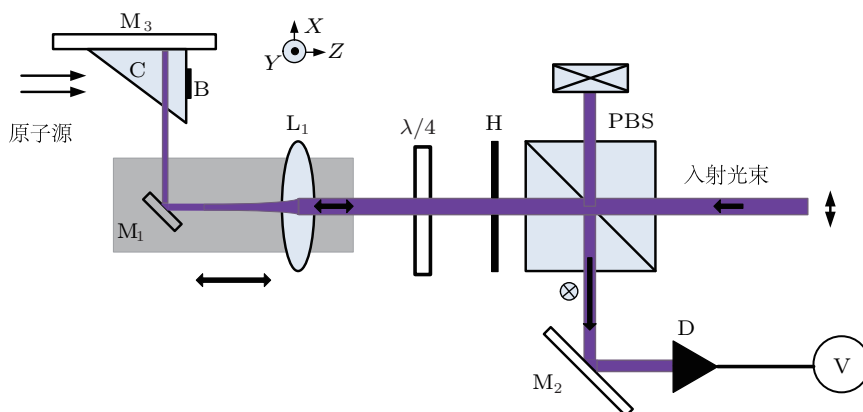


图 1 驻波场位置识别与调整机构示意图

被  $M_3$  反射的激光束沿原光路通过  $\lambda/4$  波片, 其偏振方向旋转  $90^\circ$ , 射入 PBS 后垂直反射到  $M_2$ , 光电探测器 D 接收反射光, 并通过电压表显示其信号强度. 光阑 H 的主要作用是判断  $M_3$  的反射光束是否沿原路返回. 当调整  $M_3$  使光电探测器 D 接收到的光信号达到最强时, 认为反射光路与入射光路完全重合, 形成理想的驻波场.

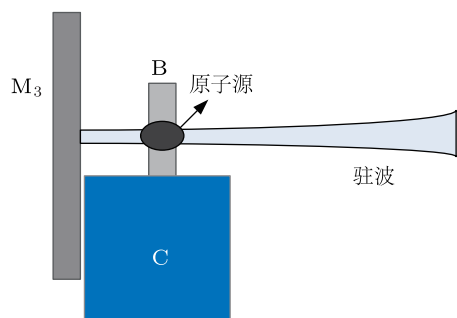


图 2 原子沉积台示意图

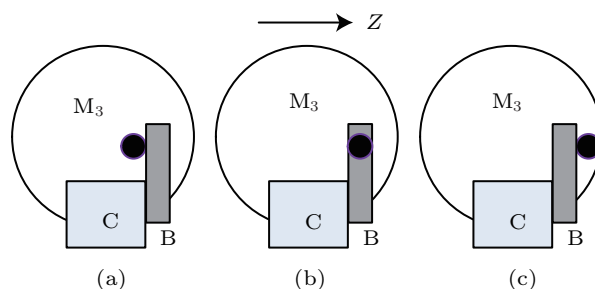


图 3 驻波场和基片间相对位置 (a) 驻波场位于基片前; (b) 驻波场与基片中心重合; (c) 驻波场位于基片后

平移图 1 中的  $M_1$  沿  $z$  向调节驻波场的位置, 如图 3 所示. 图中 C 为直角棱镜, B 为沉积基片, 黑色圆斑为驻波场. 当驻波场沿  $z$  方向平移时, 光电探测器接收经  $M_3$  反射的光强. 当驻波场与基片 B 相遇时 (图 3(a)), 由于基片侧面的散射效应, D 接收到的光强会下降. 当驻波场中心与基片 B 侧面中心重合时 (图 3(b)), D 接收到的光强最弱. 随着驻波场

继续向基片后部移动 (图 3(c)), D 收到的光强逐渐增加. 直到驻波场与基片分离, D 接收到的光强变为最大.

### 3 实验结果及分析

为实现对 Cr 原子的汇聚, 实验中所用驻波场激光频率对  $^{52}\text{Cr}$  的  $425\text{ nm } ^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$  跃迁谱线的失谐量  $\Delta/2\pi$  等于  $+200\text{ MHz}$ , 激光功率为  $30\text{ mW}$ . 由于驻波场激光的光斑质量对沉积的条纹结构具有重要影响. 理想条件下, 形成驻波场的激光束应为基横模, 且束腰应与沉积台的反射面重合. 这样反射光才能与入射光完全重合形成理想驻波场. 在实验过程中, 只要沉积台反射镜的反射面位于高斯光束的瑞利长度内, 就可以满足沉积的要求. 图 4 为用 Thorlabs 公司生产的 BP109-UV 型光束质量分析仪 (Beam Profiler) 测量的聚焦后激光束腰斑形状和尺寸. 其中, 图 4(a) 为  $z$  方向的光功率分布, 图 4(b) 为  $y$  方向的光功率分布. 据图 4 可知, 驻波场在  $z$  方向为比较理想的高斯分布,  $y$  方向近似高斯分布, 这是由于光束经过倍频腔后产生高阶横模, 经过柱透镜整形后所形成, 其影响可以忽略.

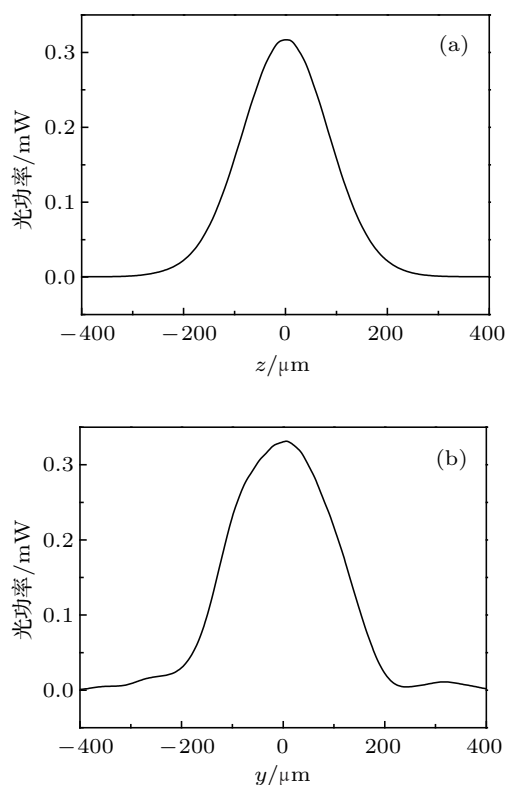


图 4 激光驻波场的光束质量 (a)  $z$  方向光功率分布; (b)  $y$  方向光功率分布

实验测得驻波场激光束腰距离透镜  $L_1$  距离约为  $400\text{ mm}$ , 由图 4 可知驻波场腰斑在  $z$  方向的宽度 ( $1/e^2$ ) 为  $341\text{ }\mu\text{m}$ ,  $y$  方向腰斑宽度 ( $1/e^2$ ) 为  $390\text{ }\mu\text{m}$ , 其综合宽度 ( $1/e^2$ ) 为  $365\text{ }\mu\text{m}$ , 则腰斑半径为  $182.5\text{ }\mu\text{m}$ . 根据高斯光束传播公式

$$w(x) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda x}{\pi w_0^2}\right)^2}, \quad (1)$$

可以得到高斯光束瑞利长度为  $x_0 = 246\text{ mm}$ . 其中腰斑半径  $w_0 = 182.5\text{ }\mu\text{m}$ , 波长  $\lambda = 425\text{ nm}$ .

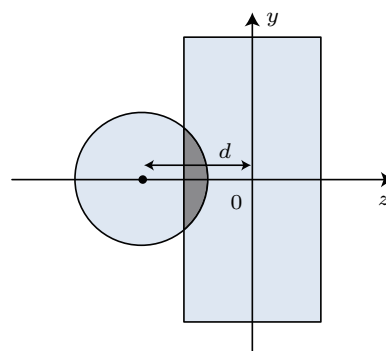


图 5 驻波场积分示意图

下面对驻波场扫描基片时, 接收器信号的变化进行理论和实验结果分析. 假设高斯光束的光强分布为

$$G(y, z) = A e^{-\frac{2y^2+z^2}{w_0^2}}, \quad (2)$$

式中  $A$  为常数,  $w_0$  为高斯光束的腰斑半径. 设基片距离激光驻波场的位置为  $d$ , 如图 5 所示, 图中阴影部分为基片遮挡激光驻波场. 在忽略光衍射的情况下, 设接收器的光强度为  $I$ , 则有

$$I \propto \int_{-\infty}^d \int_{-\infty}^{+\infty} A e^{-\frac{2y^2+z^2}{w_0^2}} dy dz, \quad (d \leq 0), \quad (3)$$

(3) 式右端的二元积分无解析解, 令  $w_0 = 182.5\text{ }\mu\text{m}$ , 对其进行数值解得到结果如图 6 虚线所示,  $d \geq 0$  部分由关于  $d = 0$  轴对称得到. 图 6 中点划线为实验测得驻波场平移时光电探测器接收的光信号变化曲线. 驻波场光斑直径  $2w_0$  实测值为  $365\text{ }\mu\text{m}$ , InP 基片的厚度为  $400\text{ }\mu\text{m}$ . 从图 6 中可以看出, 理论模拟和实验测得的反射光强随驻波场距基片距离变化的趋势高度符合. 驻波场位于基片前  $w_0$  ( $d = -w_0$ ) 时, 反射光强降至 50%; 驻波场中心与及基片中心重合时 ( $d = 0$ ), 反射光强最小. 光强从最大值变至最小值时, 驻波场所平移的距离等于驻波

场光斑直径  $2w_0$ . 由于实验过程中, 总是存在光强的损耗以及受平移台精度的限制, 导致实验测得反射光强的变化曲线不如理论模拟的曲线变化快, 且最小值略高于理论值.

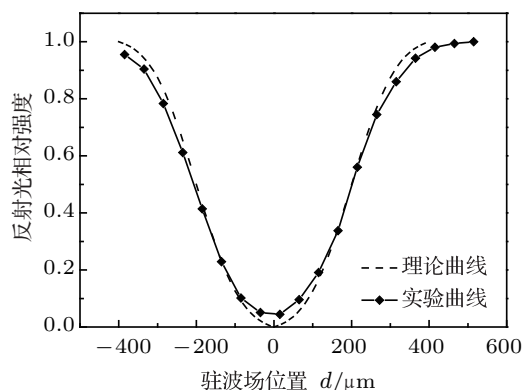


图6 反射光强随驻波场位置  $d$  变化曲线

图6的曲线将驻波场到基片之间距离的改变

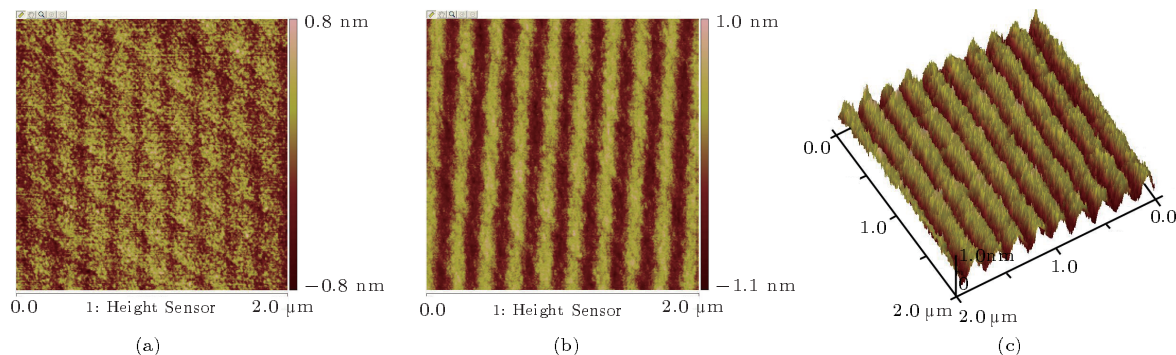


图7 铬原子沉积样板 (a) 未采用该方案前铬原子沉积样板; (b) 采用该方法后, 驻波场中心与基片距离为  $w_0$  时, 获得铬原子沉积样板; (c) 图 (b) 的三维立体图

## 4 结论

在一维铬原子沉积实验系统上, 利用光束质量分析仪测得驻波场的光斑腰斑直径 ( $1/e^2$ ) 为  $365 \mu\text{m}$ , 腰斑半径为  $182.5 \mu\text{m}$ . 提出了一种判断驻波场和沉积基片之间相对位置的实验方法. 该方法通过接收驻波场反射光强, 将驻波场到基片的距

转变为反射光强的变化, 则可以通过测量光电探测器的电信号实现准确定位驻波场中心到基片表面的距离. 通过电信号的大小来判断驻波场与基片的距离, 提高了其判断的灵敏度, 同时也增强了实验的重复性.

图7为沉积铬原子所得的纳米样板结构. (a)为直接用肉眼观察激光驻波场与基片是否接触, 粗略调节驻波场与基片间距离所获得的一维纳米样板结构. 图中竖条纹为铬原子的沉积结构, 斜条纹为基片表面自带的条纹. (b)为采用上述判断方法, 精确调节激光驻波场中心与基片表面重合时, 所得到的清晰的铬原子纳米条纹结构. (c)为其三维空间结构. 经测量铬原子条纹间距为  $(212.9 \pm 0.6) \text{ nm}$ , 条纹高度约为  $1.5 \text{ nm}$ . 采用该方法克服了肉眼直接调节的不确定性, 能够做到定量准确调节激光驻波场与基片间距离, 提高了实验的可靠性和重复性.

离转变为光电探测器的电压信号, 利用驻波场激光束腰斑直径, 达到准确定位驻波场到基片距离的目的. 通过理论模拟上述实验过程, 其结果与实验结果高度符合. 该方法实现了精确定位驻波场距基片的距离, 且在原子光刻实验中具有普遍的适用性. 同时其也为后续研究不同距离条件下, 纳米条纹结构的质量提供实验基础.

[1] Ma Y, Zhang B W, Zheng C L, Ma S S, Li F S, Wang Z S, Li T B 2007 *Acta Phy. Sin.* **56** 1365 (in Chinese) [马艳, 张宝武, 郑春兰, 马姗姗, 李佛生, 王占山, 李同保 2007 物理学报 **56** 1365]  
 [2] Li T B 2005 *SMT* **32** 8 (in Chinese) [李同保 2005 上海计量测试 **32** 8]  
 [3] Timp G, Behringer R E, Tennant D M, Cunningham J E, Prentiss

M, Berggren K K 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 1636  
 [4] McClelland J J, Scholten R E, Palm E C, Celotta R J 1993 *Science* **262** 877  
 [5] Drodofsky U, Stuhler J, Brezger B, Schulze T, Drewsen M, Pfau T, Mlynek J 1997 *Microelectron. Eng.* **35** 285  
 [6] McGowan R W, Giltner D M, Lee S A 1995 *Opt. Lett.* **20** 2535

- [7] Ohmukai S U, Watanabe M 2003 *Appl. Phys. B* **77** 415
- [8] Sligte E T, Smeets B, Van Der Stam K M R, Herfst R W, Van Der Straten P, Beijerinck H C W, Van Leeuwen K a H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4493
- [9] Drodofsky U, Stuhler J, Schulze T, Drewsen M, Brezger B, Pfau T, Mlynek J 1997 *Appl. Phys. B* **65** 755
- [10] Bradley C C, Anderson W R, McClelland J J, Celotta R J 1999 *Appl. Surf. Sci.* **141** 210
- [11] Zhao M, Wang Z S, Ma B, Li F S 2008 *Acta Opt. Sini.* **28** 381 (in Chinese) [赵敏, 王占山, 马彬, 李佛生 2008 物理学报 **28** 381]
- [12] Zheng C L, Li T B, Ma Y, Ma S S, Zhang B W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4528 (in Chinese) [郑春兰, 李同保, 马艳, 马姗姗, 张宝武 2006 物理学报 **55** 4528]

# Method of identifying the relative position between standing wave of laser light and substrate in atom lithography\*

Wang Jian-Bo<sup>1)†</sup> Qian Jin<sup>1)</sup> Yin Cong<sup>1)</sup> Shi Chun-Ying<sup>1)</sup> Lei Ming<sup>2)</sup>

1) (Division of Metrology in Length and Precision Engineering, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

2) (China Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100036, China)

(Received 10 January 2012; revised manuscript received 22 March 2012)

## Abstract

Standing wave of laser light acts as an array of lenses to focus the moving atoms in atom lithography. The position between standing wave and substrate plays an important role in determining the quality of depositional nanometer lines. Using the rule of Gaussian beam, a method of accurately identifying the position of standing wave of laser light is reported. By adjusting accurately the displacement stage which carries the beam focus lens and reflective mirror, the laser beam is subsequently shielded by depositional substrate. Signal of photoelectric detector is changed because of shielding the standing wave, so we can convert the displacement of standing wave into electrical signal. Positioning the standing wave against substrate is achieved by using the value of waist diameter of standing wave of laser light. Theoretical model is developed according to the experimental process. The result of numerical computation coincides well with the experimental record. This method realizes accurately positioning standing wave of laser light against substrate, and it provides the experimental basic for deeply studying the influence of the distance between standing wave and substrate on the quality of depositional nanometer lines.

**Keywords:** atom lithography, atom deposition, nanometer grating, standing wave of laser light

**PACS:** 06.20.-f, 37.90.+j

\* Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2006BAF06B08).

† E-mail: wjb19860818@163.com