

高斯激光非准直性对激光会聚铬原子沉积的影响

张宝武¹ 姚芦鹤¹ 陈 君² 王道档¹

¹中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

²中国计量学院 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 通过数值计算,仿真研究了高斯激光情况下基片表面不同位置处激光会聚铬原子沉积条纹结构的一致性.研究结果显示高斯激光束构成的光学势阱沿激光中轴线和垂直于激光中轴线两个方向相对于准直高斯激光都有独特的分布结构.这种独特的结构导致铬原子运动轨迹相对于波节位置对称性的破坏,进而导致沉积条纹结构发生变化:在沿激光中轴线方向上, x_0 从0 mm变化到-50 mm过程中,铬原子的运动轨迹最终的聚集区域相对于波节慢慢失去对称性,并且向 x_0 绝对值较小的一边偏离波节位置;铬原子沉积条纹的半峰全宽、中心峰值和中心线相对于波节的偏移量都随 x_0 的变化而趋向线性变化.其中,半峰全宽约有8 nm的增宽,中心峰值约有50个单位的减少量,中心线相对于波节的偏移量约有15 nm的增大量.

关键词 高斯激光; 激光会聚; 铬原子

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0602001

Effects of Non-Collimation of Gaussian Laser on Laser-Focused Cr Atom Deposition

Zhang Baowu¹ Yao Luyu¹ Chen Jun² Wang Daodang¹

¹College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract The uniformity of the deposited lines by laser-focusing along the substrate surface is simulated with Gaussian laser. The result shows that the optical potential formed by the Gaussian laser is different from the collimated Gaussian laser either along or perpendicular to the laser axis. This difference results in asymmetry of atomic trajectories related to the laser standing node, and the congregation area is offset to smaller than absolute value of x_0 when x_0 varies from 0mm to -50mm. Consequently, all the full width at half maximum (FWHM), center peak and offsets of center of the deposited lines have the linear variations with x_0 , and each of them has 8nm increase, 50 units decrease and 15nm increase, respectively, when x_0 varies from 0mm to -50 mm.

Key words Gaussian laser; laser focusing; Cr atom

OCIS codes 020.1335; 020.7010; 050.1960

1 引 言

激光操纵原子运动的一个实际应用就是利用激光偶极力会聚铬原子束沉积纳米条纹^[1],研制纳米传递标准^[2-3],它为纳米测量仪器中长度精确测量和溯源问题的解决提供了一条崭新的思路.为了促进这种标准的实用化,提高沉积条纹的精细度,国内外相关小组除了进行实验研究之外,也进行了比较深入的理论仿真,至今,已经获得了丰硕的成果^[4-8].它们一定程度上反映了各种因素对原子沉积条纹精细化的影响程度.仔

收稿日期: 2014-10-23; 收到修改稿日期: 2015-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61108005, 61205082, 11404312)、浙江省自然科学基金(LQ13F050002)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ14206)、广西自然科学基金(2014GXNSFGA118003、2013GXNSFDA019002)

作者简介: 张宝武(1978—),男,博士,副教授,主要从事激光技术应用方面的研究. E-mail: zhangbaowu@126.com

细研读这些论文,发现它们在处理会聚激光束的时候基本上都假设入射激光束在传播过程中截面半径保持束腰大小不变(本文定义为准直高斯光束)。这样,基片表面每一位置处会聚激光场的结构都一样,进而沉积条纹结构也不会受到影响。而实际上,激光会聚铬原子束实验采用的激光场是高斯激光束。那么,基片表面每一个位置处将给出不同的激光场结构,进而沉积条纹也将不同。这就需要对如下问题进行探究:在激光会聚铬原子沉积实验中,沉积基片沿激光中轴线方向上能够使用的尺寸有多大?在这个延展范围内原子沉积条纹的一致性如何?为此,本文详细研究了实验参数高斯激光情况下基片表面不同位置处沉积条纹的一致性,其中包括光学势阱结构,铬原子的运动轨迹和铬原子的沉积条纹结构等。

2 理论分析

理论仿真所依据的实验装置如图1所示,其中准直铬原子束沿着 z 轴方向自上而下传播,会聚激光束沿着 x 轴自左向右传播,其中轴线在基片沉积表面内,而束腰严格位于反射镜上。这里说明一点,由于激光中轴线在沉积基片内,那么基片边缘就会对激光产生衍射,相关分析请查阅文献[8-9]。为了考察激光准直性对沉积影响的本质特性,所以暂不考虑基片衍射。

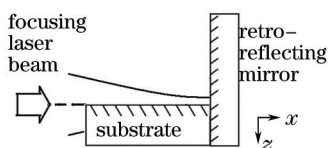


图1 激光束、基片和反射镜之间的位置关系

Fig.1 Position of focusing laser beam, substrate and retro-reflecting mirror

入射高斯激光在传播途中任一点 P 的复振幅 $\tilde{E}_1(y_1, z_1)$ 表示为^[9]:

$$\tilde{E}_1(y, z) = \frac{E_0}{w(x)} \exp\left[-\frac{z^2 + y^2}{w^2(x)}\right] \exp\left\{ik\left[x + \frac{z^2 + y^2}{2R(x)}\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 E_0 为激光中轴线上的振幅, $w(x)$ 为 x 位置处激光束的截面半径, $R(x)$ 为 x 位置处激光波面曲率半径, i 是虚数单位, $k = 2\pi/\lambda$ 是光波波数, λ 是光波波长, x 、 y 、 z 为坐标量。

理想情况下,激光束被假设成准直激光以后,则它在传播过程中保持束腰大小不变,也就是说(1)式改写成:

$$\tilde{E}_1(y, z) = \frac{E_0}{w_0} \exp\left[-\frac{z^2 + y^2}{w_0^2}\right] \exp(ikx), \quad (2)$$

(1)式和(2)式所示的行波场遇到反射镜时,各自会被原路反射,形成各自的反射波 $\tilde{E}_2(P)$ 。相互对应的反射波和入射波在 P 点相遇叠加后就会形成驻波场。总的光强表达式为:

$$I(P) = [\tilde{E}_1(P) + \tilde{E}_2(P)][\tilde{E}_1^*(P) + \tilde{E}_2^*(P)], \quad (3)$$

将(3)式代入到会聚原子的光学势阱表达式^[3]中得:

$$U(P) = \frac{\hbar\Delta}{2} \ln\left[1 + \frac{I(P)}{I_s} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4\Delta^2}\right], \quad (4)$$

式中 \hbar 为除以 2π 的普朗克常数, Δ 为激光频率失谐量, Γ 是原子跃迁的自然线宽, I_s 为原子跃迁的饱和强度。

文献[10]基于经典粒子模型,推导了光学势阱中原子运动的轨迹方程,

$$x'' = \frac{1 + x'^2}{2(E_0 - U)} \left(x' \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (5)$$

式中 $x' = \frac{\partial x}{\partial z}$; $x'' = \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}$; $E_0 = mv^2/2$,其中, m 为原子质量, v 为原子纵向速度。联合(4)式和(5)式,即可仿真会聚激光场中原子运动轨迹和沉积条纹。

3 仿真结果和讨论

我们在利用(5)式进行数值仿真的过程中用到的参数如下:与 ^{52}Cr 原子共振跃迁 $^7\text{S}_3 \rightarrow ^7\text{P}_2^0$ 对应的激光波

长为 $\lambda = 425.55 \text{ nm}$, 跃迁谱线的自然线宽为 $\Gamma = 2\pi \cdot 5 \text{ MHz}$, 饱和光强为 $I_s = 85 \text{ W/m}^2$, 激光失谐量为 $\Delta = 2\pi \cdot 250 \text{ MHz}$ 。另外, 激光束腰为 $w_0 = 0.1 \text{ mm}$, 入射激光功率为 $P_0 = 3.93 \text{ mW}$ 。仿真过程中, 直角坐标系 x 轴的原点设在反射镜处, z 轴的原点设置在基片沉积表面。基片沉积表面固定于 $z = 0$ 的平面内。 x 方向上, 对于任意给定的一个点 x_0 , 首先以半波长为单位计算出离 x_0 最近的波节, 然后取大于 x_0 绝对值的第一个波长范围进行仿真; z 方向上, 以束腰为单位, 取 $[-1.5w_0, 0]$ 的范围进行仿真。为了描述方便, 用“collimated laser”表示准直高斯激光, 其他都是高斯激光。

首先仿真了光学势阱在基片表面 x 方向和 z 方向上的变化, 如图 2 所示。其中图 2(a) 为基片表面任意位置 x_0 处的光学势阱随 x 的变化, 图 2(b) 为基片表面任意位置 x_0 处驻波波节位置光学势阱随 z 的变化。

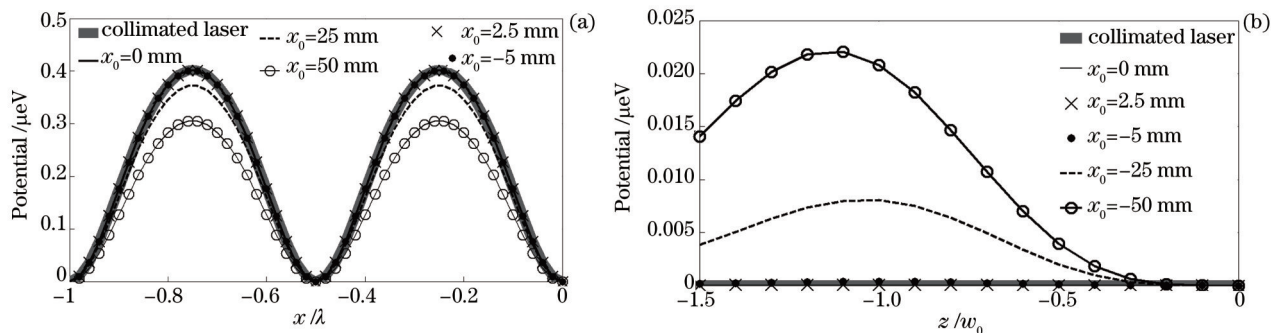


图 2 基片表面光学势阱在 x 方向(a)和 z 方向(b)上的变化

Fig.2 Variations of optical potential along x axis (a) and z axis (b) on the substrate surface

图 2 显示, 当高斯激光被准直处理以后, 不管在 x 方向还是在 z 方向上, 光学势阱变化情况不随 x_0 值的变化而变化: 在基片表面任何 x_0 值处, 光学势阱在 x 方向上一个波长范围中呈现驻波形式, 并且保持最大值不变; 在相应驻波的波节处, 光学势阱沿 z 轴保持零值不变。相比之下, 高斯激光在相同位置处呈现不一样的变化情况, 光学势阱在 x 方向上一个波长范围中变化, 以及在相应驻波的波节处沿 z 轴的变化随 x_0 的不同而不同: 在 $x_0 \in [-5, 0] \text{ mm}$ 区域内不管 x 方向还是 z 方向, 高斯激光和准直高斯激光几乎一致; 在 $x_0 < -5 \text{ mm}$ 的区域内, 高斯激光的光学势阱随 x 的变化虽然保持驻波形式不变, 但是最大值明显比准直高斯激光束的小, 同时, 在对应的驻波波节处, 高斯激光的光学势阱随 z 的变化不再保持零值不变, 而是呈现一种类似于麦氏速率分布的曲线, 这个变化曲线的最大值随着 x_0 的变化不仅数值不固定, 而且位置也不固定。上述高斯激光不同于准直高斯激光的光学势阱将直接影响铬原子在其中的运动状态, 从而影响沉积条纹结构。图 3 和图 4 分别为高斯激光情况下铬原子的运动轨迹和沉积条纹。鉴于图 2 中准直光学势阱不随 x_0 的变化而变化, 那么不同的 x_0 位置处铬原子的运动轨迹都和 $x_0 = 0$ 处的一样, 图 3 和图 4 就以 $x_0 = 0$ 位置上铬原子运动轨迹和沉积条纹代替其他所有 x_0 处准直情况下的铬原子运动轨迹和沉积条纹。

从图 3 中可以清楚地看出高斯激光非准直性确实会影响铬原子的运动轨迹: 在 $x_0 \in [-5, 0] \text{ mm}$ 区域内, 铬原子的运动轨迹相对于波节 ($x = -0.5 \lambda$) 几乎保持对称性不变; 在 $x_0 < -5 \text{ mm}$ 区域内, 随着 x_0 绝对值的变大, 铬原子的运动轨迹相对于波节的对称性慢慢变差, 最终的聚集区域向 x_0 绝对值较小的一边偏离波节位置。

图 4 中不同 x_0 处沉积条纹证实了图 3 铬原子的运动轨迹: 在 $x_0 \in [-5, 0] \text{ mm}$ 区域内, 铬原子的沉积条纹相对于波节 ($x = -0.5 \lambda$) 几乎保持对称性不变; 在 $x_0 < -5 \text{ mm}$ 区域内, 随着 x_0 绝对值的变大, 铬原子沉积条纹的中心线慢慢偏离波节 ($x = -0.5 \lambda$) 位置, 总的趋势偏向于 x_0 绝对值较小的一边。

为了更清晰地考察沉积条纹结构随 x_0 的变化情况, 获取了图 4 沉积条纹的半峰全宽(FWHM)和最大值, 以及沉积条纹中心线相对于波节的偏移量。它们随 x_0 的变化情况如图 5 所示。

图 5(a)显示, 当 x_0 从 0 mm 变化到 -50 mm 过程中, 铬原子沉积条纹的半峰全宽和中心峰值随 x_0 的变化而趋向线性变化。其中, 半峰全宽约有 8 nm 的增宽, 中心峰值约有 50 个单位的减少量。图 5(b)显示, 铬原子沉积条纹的中心线相对于波节的偏移量随着 x_0 的变大趋向线性增大, 在 x_0 的变化范围内有 15 nm 的增大量。

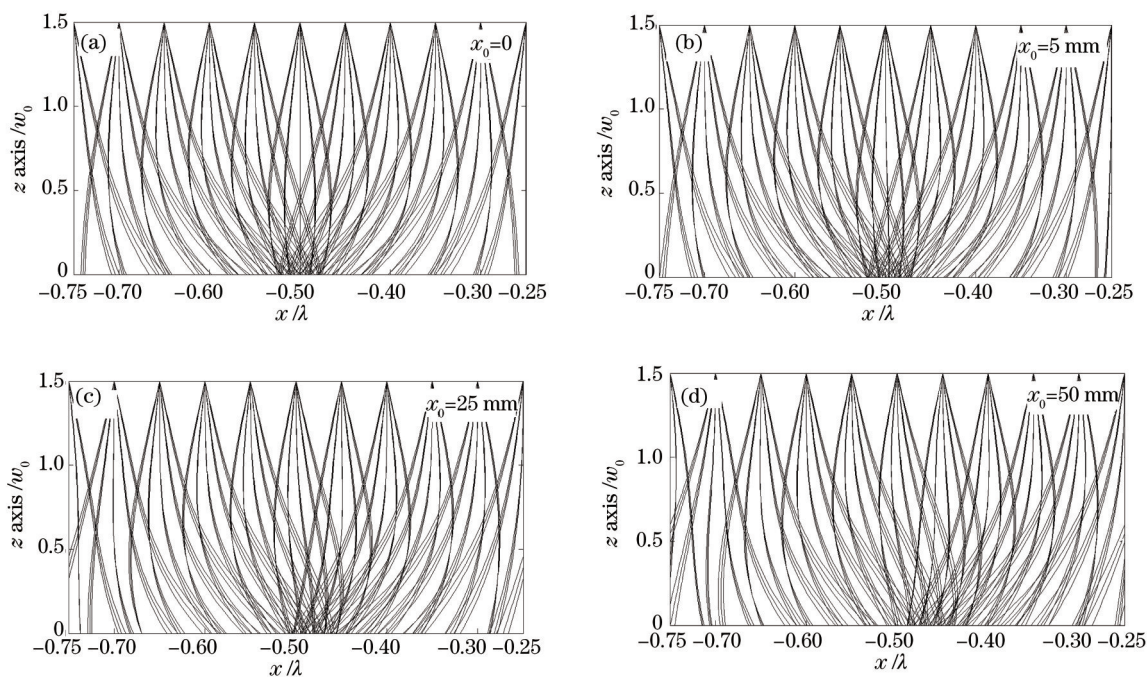


图 3 基板表面不同 x_0 处高斯激光条件下铬原子的运动轨迹

Fig.3 Atomic trajectories located different x_0 on the substrate surface under Gaussian laser

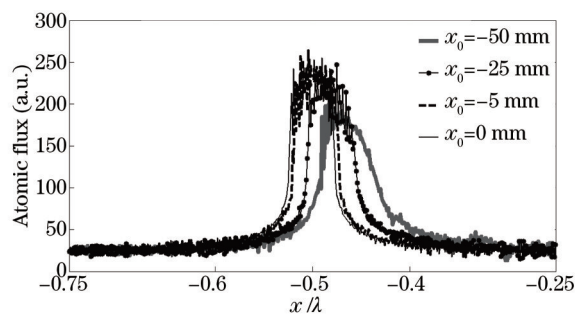


图 4 基板表面不同 x_0 处高斯激光条件下铬原子的沉积条纹

Fig.4 Atomic deposition lines located different x_0 on the substrate surface under Gaussian laser

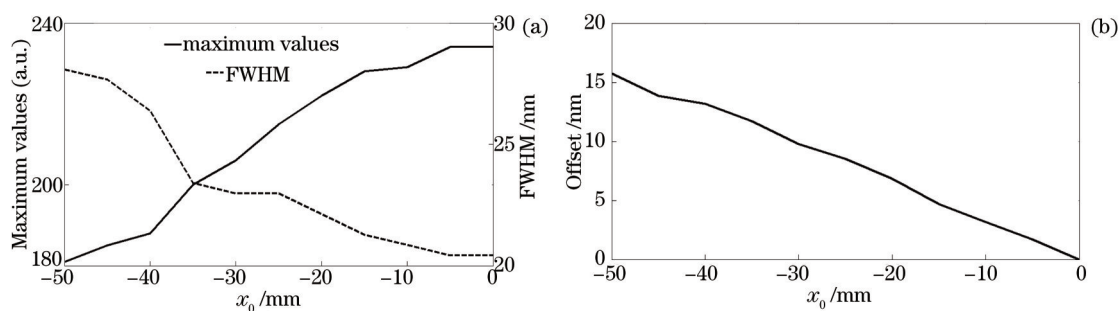


图 5 基板表面不同 x_0 处半峰全宽和最大值(a), 条纹中心相对波节偏移量(b)随 x_0 的变化

Fig.5 Variations of FWHM and maximum values (a), line center related to node (b) with x_0

4 结 论

针对激光会聚铬原子沉积实验,从高斯激光准直与否与构成的光学势阱结构入手,理论仿真了实验参数高斯激光情况下沉积条纹沿激光中轴线不同位置处的一致性,得到了不同于准直高斯激光的研究结果。从中可以明确,在该激光条件下,实验中最好将基板在激光中轴线方向上的大小限制在 5 mm 左右。这样,在整个区域内,光学势阱不会有太大的变化,沉积条纹结构更是可以保持很好的一致性。由于高斯激光的瑞

利长度决定了其传播过程中束腰近似不变的范围,因此,实验中应尽量获得大的瑞利长度,以便使用幅度更大的基片。

参 考 文 献

- 1 McClelland J J, Scholten R E, Palm E C, *et al.*. Laser focused atomic deposition[J]. *Science*, 1993, 262(5): 877-880.
- 2 Li Tongbao. Nanometrology and transfer standard[J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2005, 1(185): 8-13.
李同保. 纳米计量与传递标准[J]. *上海计量测试*, 2005, 1(185): 8-13.
- 3 McClelland J J, Anderson W R, Bradley C C, *et al.*. Accuracy of nanoscale pith standards fabricated by laser-focused atomic deposition[J]. *J Res Natl Inst Stand Technol*, 2003, 108(2): 99-113.
- 4 Zhang Wentao, Zhu Baohua, Huang Jing, *et al.*. Chromium atom deposition in elliptical standing wave field[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(10): 103203.
张文涛, 朱保华, 黄 静, 等. 偏斜椭圆激光驻波场作用下中性原子沉积纳米光栅结构特性分析[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 103203.
- 5 Zhang Pingping, Ma Yan, Li Tongbao. Optimization of particle optics model for one-dimensional atom lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0514004.
张萍萍, 马 艳, 李同保. 一维原子光刻经典模型的优化[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0514004.
- 6 Zhang Pingping, Ma Yan, Zhang Baowu, *et al.*. Properties of 3D nanostructures fabricated by laser-focused Cr atomic deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1114001.
张萍萍, 马 艳, 张宝武, 等. 激光会聚铬原子光栅三维特性分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1114001.
- 7 Chen Sheng, Ma Yan, Zhang Pingping, *et al.*. Analysis of Cr atom focusing deposition properties in the double half Gaussian standing wave field[J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(2): 020301.
- 8 Zhang Baowu, Ma Yan, Zhang Pingping, *et al.*. Effects of substrate diffraction on evolution of the atom wave-packet probability density in the focused laser standing wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1205003.
张宝武, 马 艳, 张萍萍, 等. 基片衍射对会聚激光驻波场中原子波包几率密度演化的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1205003.
- 9 Zhang Baowu, Zhang Wentao, Wang Daodang, *et al.*. Effects of substrate position on laser-focused Cr atom deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0805002.
张宝武, 张文涛, 王道档, 等. 基片位置对激光会聚铬原子沉积的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0805002.
- 10 McClelland J J. Atom-optical properties of a standing-wave light field[J]. *JOSA B*, 1995, 12(10): 1761-1768.

栏目编辑: 刘丰瑞