

激光功率对铬原子束一维沉积的影响

张宝武¹ 马艳¹ 李同保¹ 张文涛²

(¹ 同济大学物理系, 上海 200092; ² 桂林电子科技大学电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要 以粒子光学方法为基础, 利用适当步长的四阶 Runge-Kutta 算法模拟研究了准直铬原子束经过波长为 425.55 nm, 功率分别为 3.93 mW 和 40 mW 的一维高斯激光驻波场汇聚作用后所沉积的一维条纹情况。在以上两种激光功率下, 沉积条纹沿 ox 方向的结构质量的周期性相同, 而沿着 oy 方向的结构质量却存在很大的差异: 在 3.93 mW 时, 每一根沉积条纹在 oy 方向上都非常清晰, 并且半高宽在 $[-0.5, 0.5]$ (以激光束腰半径为单位) 的区域内具有较好的一致性, 对比度在 $[-0.2, 0.2]$ 区域内有较好一致性; 在 40 mW 时, 每一根沉积条纹呈现出较为复杂的结构, 在激光束的中轴区域附近 $[-1.08, 1.08]$ 内, 原本在 3.93 mW 时的一根条纹分裂成三根。另外, 3.93 mW 时 $y=0$ 的平面内条纹情况和 40 mW 时 $y=\pm 1.08$ 平面内情况对应性很好, 即平均间距为 212.78 nm, 半高宽为 21.65 nm, 对比度为 24.78。分析结果表明, 较好地沉积条纹与适当激光功率有关。

关键词 激光技术; 激光汇聚; Runge-Kutta 算法; 铬原子束

中图分类号 O411.3; O43; O56 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0421

Effect of Laser Power on One-Dimensional Deposition of Chromium Atomic Beam

Zhang Baowu¹ Ma Yan¹ Li Tongbao¹ Zhang Wentao²

¹ Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China

² Department of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guangxi, Guilin 541004, China

Abstract Deposition of collimated chromium (Cr) atomic beam focused by one-dimensional Gaussian standing-laser field with wavelength of 425.55 nm and powers of 3.93 mW and 40 mW is examined from particle-optics approach, using fourth-order Runge-Kutta algorithm with adaptive step size. The results show that the deposited structure has uniform periodicity along ox direction, while the structure quality has much difference along oy direction with different laser powers. When laser power is 3.93 mW, each nanoline is very clear, and the full width at half maximum (FWHM) is uniform in range of $[-0.5, 0.5]$, where the unit is one laser waist radius, and the contrast is uniform in range of $[-0.2, 0.2]$ along oy direction. When laser power is 40 mW, the nanostructure has three nano lines at the place where only one nanoline for 3.93 mW in range of $[-1.08, 1.08]$ along oy direction. In addition, the structure in the plane of $y=0$ for 3.93 mW is similar to that in the plane of $y=\pm 1.08$ for 40 mW, i. e. the average space is 212.78 nm, FWHM is 21.65 nm, and the contrast is 24.78. So the good deposited structure should correspond to suitable laser power.

Key words laser technique; laser focusing; Runge-Kutta algorithm; chromium atomic beam

1 引言

激光汇聚原子束沉积纳米光栅结构技术可以制备出平均间距为 $\lambda/2$ 的平行栅型结构^[1,2]。它为纳米传递标准的研制提供了一种技术可能^[3,4]。这方

面的理论计算是进行原子束汇聚沉积的重要组成部分, 并且形成了多种分析方法^[5~7]。相关的模拟多关注于高斯激光束汇聚沉积条纹在原子束中轴线 (oz 方向) 和激光束轴线 (ox 方向) 所决定的平面

收稿日期: 2008-02-25; 收到修改稿日期: 2008-07-18

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAF06B08)资助课题。

作者简介: 张宝武(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事原子光刻技术方面的研究。E-mail: zhangbaowu@126.com

导师简介: 李同保(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学计量方面的研究。E-mail: tbli@tongji.edu.cn

xoz 内沿激光束轴线方向上的周期性结构质量(半高宽和对比度)^[5~7], 而沉积条纹沿 oy 方向结构质量的一致性讨论较少, 其实这也是评价沉积条纹结构质量的一个重要方面。另外, 从文献[8]中可知, 沉积条纹沿 oy 方向结构质量是否一致为研究沉积条纹随激光功率的变化关系提供了另一条途径。

本文以经典的粒子光学为基础, 利用适当步长的四阶 Runge-Kutta 算法模拟研究了准直铬原子束经过波长为 425.55 nm, 功率分别为 3.93 mW 和 40 mW 的一维高斯激光驻波场汇聚作用后所沉积的条纹。着重分析了 3.93 mW 时沉积条纹沿 oy 方向的结构质量。另外, 通过激光驻波场所形成的光学势阱表达式, 建立了 3.93 mW 时 $y=0$ 平面与 40 mW 时 $y=\pm 1.08$ 平面之间的等价联系, 考察了文献[5]给出的最佳激光功率公式。

2 模型的基础理论

假设沿 oz 方向传输的铬原子束由封闭二能级原子组成。在稳态的情况下, 激光驻波场形成的光学势阱可以表示为^[9]

$$U_{\text{dip}} = \frac{\hbar\Delta}{2} \ln[1 + p_0 G(x, y, z)], \quad (1)$$

式中 $p_0 = \frac{I_0}{I_s} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4\Delta^2}$, \hbar 为除以 2π 后的普朗克常数, I_0 为激光强度, Γ 为原子跃迁的自然线宽, I_s 为原子跃迁的饱和强度, Δ 是激光频率对原子共振跃迁的失谐量。对于一个沿 ox 轴传播的高斯激光驻波场而言, 有

$$G(x, y, z) = \exp[-2(z^2 + y^2)/\omega^2] \cdot \sin^2(kx), \quad (2)$$

式中 ω 为激光束的束腰半径, k 为激光波矢。利用保守系的拉格朗日方程可得原子在光学势阱中的运动方程为(推导过程中忽略激光场对原子沿 y 轴方向的作用力)^[5,6]

$$x'' = \frac{1 + x'^2}{2(E_0 - U_{\text{dip}})} \left(x' \frac{\partial U_{\text{dip}}}{\partial z} - \frac{\partial U_{\text{dip}}}{\partial x} \right), \quad (3)$$

式中 x' 和 x'' 分别为 x 对 z 的一阶和二阶微分, E_0 为原子的动能。以下将利用适当步长的四阶 Runge-Kutta 算法求解(3)式来模拟铬原子在一维高斯激光驻波场中的运动和沉积。铬原子束的纵向速度服从 Maxwell-Boltzmann 分布, 其横向速度分布服从高斯分布。相关模拟参数如表 1 所示。模拟图中的坐标 x 以激光波长 λ 为单位, y 和 z 以激光束的束腰半径 ω 为单位。

表 1 用于模拟的参数

Table 1 Parameters for simulation

Transition of ^{52}Cr	$^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$
Wavelength λ /nm	425.55
Natural line-width Γ / 2π MHz	5
Saturation parameters I_s /(W/m^2)	85
Mass of Cr M /(g/mol)	52
Laser power P /mW	3.93 or 40
Laser frequency detuning Δ / 2π MHz	250
Laser beam waist ω / μm	100
Temperature of oven T /K	1923
The most probable longitudinal velocity V_{mp} /(m/s)	960
Collimation of Cr atomic beam ^[10] α /mrad	0.16

3 模拟结果

3.1 不同激光功率下光学势阱中铬原子的运动轨迹

图 1 给出了两种激光功率下驻波场中 xoz 平面内铬原子的运动轨迹。为了显示清晰, 只考虑一个驻波周期内的 520 条轨迹。从中可以看出, 在不同的激光功率下, 铬原子束在穿过驻波场的过程中都是先被驻波势阱汇聚, 然后才慢慢扩散开来。激光功率为 3.93 mW 时, 铬原子束的汇聚点只有一个, 并且处于激光束的中心处, 而激光功率为 40 mW

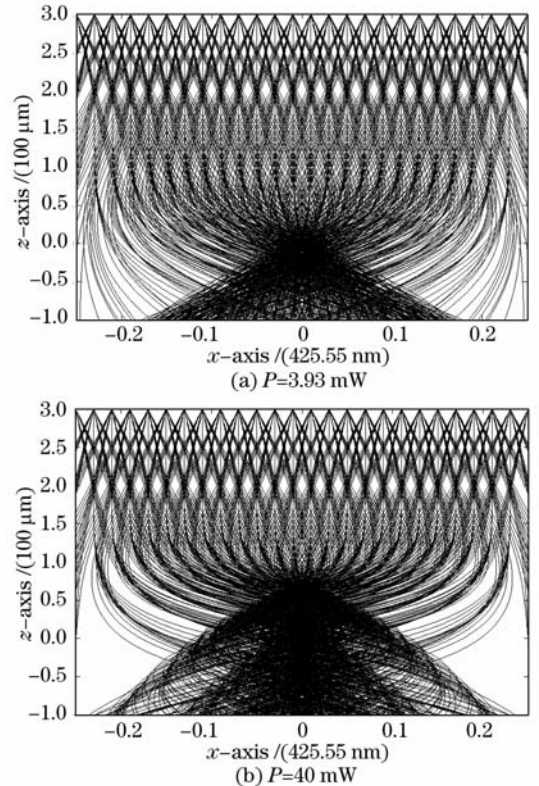


图 1 不同激光功率下光学势阱中铬原子的运动轨迹
Fig. 1 Cr atomic trajectories in optical potential with different laser powers

时,铬原子束的汇聚点有多个,并且第一个汇聚点明显处于激光束的中心之前。这是因为在束腰半径不变的情况下,激光功率的增大意味着激光强度的增大,由(1)式可知,此时驻波势阱对原子的作用力也会变大,因此,原子的运动轨迹就会偏折得厉害,甚至原子在到达基板之前就已经被汇聚了。

3.2 不同功率下的沉积条纹

图2为两种激光功率下所模拟的沉积条纹。从中可以看出,在两种激光功率下,沉积条纹沿 ox 方向的结构质量的周期性相同。但是沉积条纹沿 oy 方向上的结构质量差别很大:当激光功率为3.93 mW时,

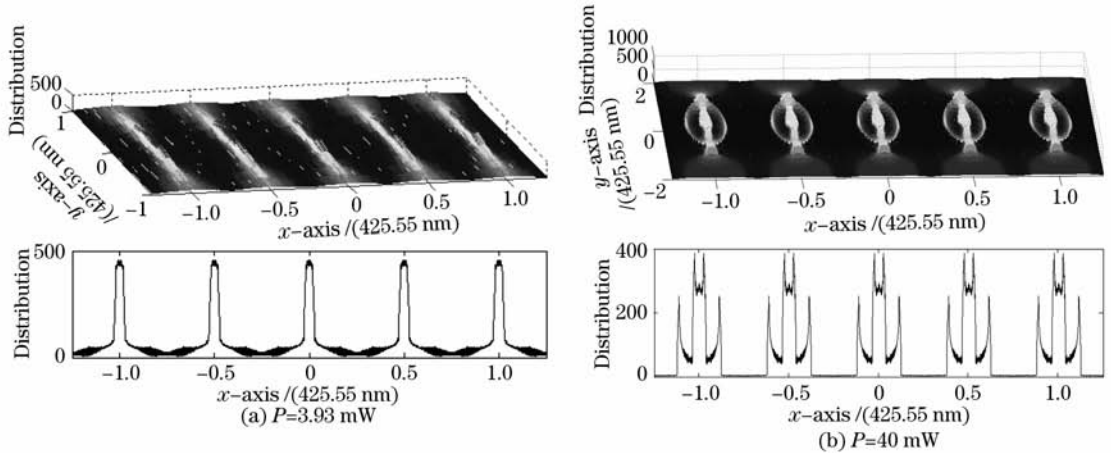


图2 不同激光功率下模拟的沉积条纹(原子轨迹数 346680)

Fig. 2 Simulated deposited nanolines with different laser powers (atom number of 346680)

图3为3.93 mW时沉积条纹沿 oy 方向的结构质量。其中,只显示了 $y > 0$ 的区域,而 $y < 0$ 的区域变化趋势与此对称。从中可以看出, $y = 0$ 的平面内条纹的半高宽为21.65 nm,对比度为24.78。沉积条纹的半高宽在 oy 方向上 $[-0.5, 0.5]$ 内具有较好的一致性,即变化不大,超过这个区域后,会迅速地变大,而对比度具有较好一致性的区域较小,范围

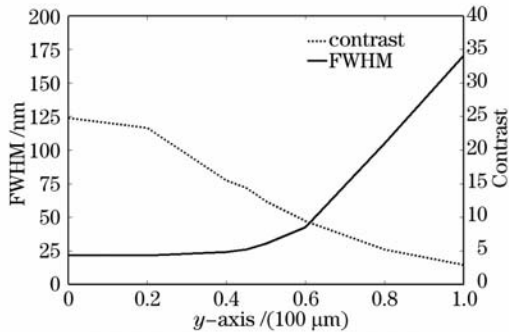


图3 条纹结构质量沿 oy 方向上的变化($P=3.93$ mW)

Fig. 3 Variation of structure quality of nanolines along oy direction ($P=3.93$ mW)

每一根沉积条纹在 oy 方向上较大的范围内一致性较好,并且每一根条纹都是非常清晰的;当激光功率为40 mW时,每一根沉积条纹呈现出较为复杂的结构,在激光束的中轴区域附近 $[-1.08, 1.08]$ 内,原本在3.93 mW时的一根条纹分裂成三根,其中的中心条纹在 oy 方向上保留有一定的一致性,而两边的条纹却在 oy 方向随着远离激光束中轴线而慢慢地与中心条纹汇合。在此区域之外,条纹恢复到功率为3.93 mW时的情况。这种沉积条纹的结构与图1中原子的运动轨迹相对应。

约为 $[-0.2, 0.2]$,超过这个区域后,会迅速降低。

由此可见,在实验中过高的增大激光功率并不能获得较好的沉积条纹。适当激光功率的选择,可参考文献[5]给出的(23)式。高斯型激光强度和激光功率之间的关系:

$$I_0 = \frac{2P_0}{\pi\omega^2}. \quad (4)$$

结合(1)式可得在激光束腰一定的情况下,3.93 mW下光学势阱平面 $y=0$,在40 mW下相对应的光学势阱平面为 $y = \pm 1.08$ 。40 mW时 $y = \pm 1.08$ 平面和3.93 mW时 $y=0$ 平面内的条纹沿着 ox 方向的周期性结构质量,如图4所示。图中显示出两者的对应性很好,即平均间距为212.78 nm,半高宽为21.65 nm,对比度为24.78。仔细研究后发现40 mW时 $y = \pm 1.08$ 的平面正好是此功率下三条纹结构和一条纹结构之间发生变化的临界面。由此,文献[5]所给的选择适当激光功率的公式对实验具有指导意义。

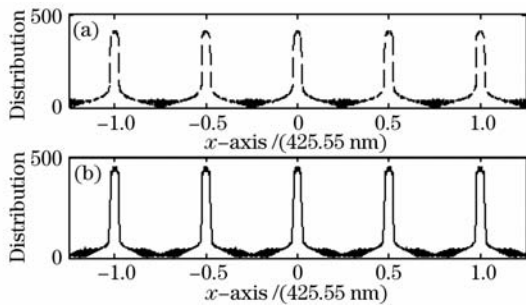


图 4 不同激光功率下对应光学势阱平面内沉积条纹结构质量沿着 ox 方向的变化(原子轨 346680)。(a) $P=3.93$ mW 时 $y=0$ 的平面, (b) $P=40$ mW 时 $y=\pm 1.08$ 的平面

Fig.4 Variation of structure quality of nanolines along ox direction in corresponding plane of optical potential with different laser powers (atom number of 346680). (a) Plane of $y=0$ with $P=3.93$ mW, (b) plane of $y=\pm 1.08$ with $P=40$ mW

4 结 论

以原子与激光相互作用的原子轨道方法的理论模型为基础,利用数值方法模拟研究了准直铬原子束经过波长为 425.55 nm,两种激光功率下的一维高斯激光驻波场汇聚作用后所沉积的条纹。结果表明,在实验中过高地增大激光功率并不能获得较好的沉积条纹,应以文献[5]所给的选择适当激光功率的公式使激光功率与其束腰半径、频率失谐量等参数相匹配。

参 考 文 献

1 J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm *et al.*. Laser-focused atomic deposition[J]. *Science*, 1993, **262**(5135): 877

2 G. Timp, R. E. Behringer, D. M. Tennant *et al.*. Using light as a lens for submicron, neutral-atom lithography[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(11): 1636

3 J. J. McClelland, W. R. Anderson, C. C. Bradley *et al.*. Accuracy of nanoscale pith standards fabricated by laser-focused atomic deposition[J]. *Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2003, **108**(2): 99

4 Li Tongbao. Nanometrology and transfer standard[J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2005, **32**(1): 8
李同保. 纳米计量与传递标准[J]. *上海计量测试*, 2005, **32**(1): 8

5 J. J. McClelland. Atom-optical properties of a standing-wave light field[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(10): 1761

6 Zheng Chunlan, Li Tongbao, Ma Yan *et al.*. Analysis of Cr atom trajectory and focusing deposition in the standing wave field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9): 4528
郑春兰,李同保,马艳等. 激光驻波场中 Cr 原子运动轨迹与汇聚沉积的分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4528

8 Chen Xianzhong, Yao Hanmin, Chen Xunan. Classical simulation of atomic beam focusing and deposition for atom lithography[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 187

7 C. J. Lee. Quantum-mechanical analysis of atom lithography[J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **61**(6): 063604
T. Kidan, J. Adler, A. Ron. Numerical simulations of an atomic beam focused by an optical potential[J]. *Computers in Physics*, 1998, **12**(5): 471
He Ming, Wang Jin, Tu Xianhua *et al.*. Quantum-mechanical simulation of an atomic beam focused by an optical standing wave[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(3): 292
Min Zhao, Zhanshan Wang, Yan Ma *et al.*. Quantum simulation for peak broadening in atom lithography[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10): 602

8 W. R. Anderson, C. C. Bradley, J. J. McClelland *et al.*. Minimizing feature width in atom optically fabricated chromium nanostructures[J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **59**(3): 2476

9 J. Dalibard, C. Cohen-Tannoudji. Dressed-atom approach to atomic motion in laser light: the dipole force revisited[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2**(11): 1707

10 R. E. Scholten, R. Gupta, J. J. McClelland *et al.*. Laser collimation of a chromium beam[J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(2): 1331