

文章编号: 1001-3806(2015)02-0215-05

直边衍射激光驻波场中铬原子的沉积特性研究

肖宇馨, 张文涛*

(桂林电子科技大学 电子工程学院, 桂林 541004)

摘要: 为了研究沉积基片对激光驻波场的影响, 基于半经典理论, 采用 4 阶龙格-库塔算法对直边衍射效应影响下铬原子的 3 维运动轨迹和 3 维沉积条纹结构进行了仿真。研究了激光束腰中心到反射镜的距离、高斯激光束腰半径对最终沉积过程的影响。结果表明, 通过适当地调节实验参量, 可以改变激光驻波场受到衍射效应的程度; 当反射镜位于激光束腰截面处、高斯激光束腰半径为 $62.5\mu\text{m}$ 时, 纳米沉积条纹的质量最理想。这将为原子光刻实验提供有益的理论依据和数据信息。

关键词: 激光光学; 衍射效应; 龙格-库塔算法; 高斯光束

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.015

Research of deposition characteristics of Cr atoms in laser standing wave field with straight edge diffraction

XIAO Yuxin, ZHANG Wentao

(Department of Electrical Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the diffraction effect of deposition substrate on laser standing wave field, 3-D motion trail and stripe structure were simulated using the fourth-order Runge-Kutta algorithm under straight edge diffraction effect based on the semi-classical theory. The distance from laser beam waist center to mirror and the effect of the radius of Gaussian laser beam waist on the process of final deposition were discussed. The results show that diffractive degree will be changed by adjusting the experiment parameters reasonably. The quality of deposition stripe structure will be achieved optimally when the mirror is placed on the cross section of laser beam waist, and the radius of Gaussian laser beam waist equals $62.5\mu\text{m}$. It provides the useful theoretical foundation and data information in the field of atomic lithography study.

Key words: laser optics; diffraction effect; Runge-Kutta algorithm; Gaussian beam

引 言

操纵中性原子的激光捕获技术在原子光学领域中具有显著的优势。其中, 最有前景的一项应用是原子光刻技术, 利用激光汇聚铬原子沉积技术得到稳定的光栅结构可以作为纳米级的长度基准^[1]。

在实际的沉积过程中, 一般将基片的上表面置于激光中轴线的位置, 这样, 基片边缘与激光光束就构成了直边菲涅耳衍射的物理模型^[2], 由于基片的边缘挡住了部分激光的传播, 形成的激光驻波场就会相应地变化, 原子在直边衍射激光驻波场中受到非均匀偶极力的操纵, 将会沿着特定的路径运动, 最终在基片上沉积出以光波长一半为周期的条纹结构^[3]。2007 年, KUMAR 等人提出了由几何波和边界衍射波叠加构成的直边衍射模式, 并利用双光束全息干涉仪和衍射干涉仪对实验结构进行了论证^[4]。2009 年, TANTUSSI 等人提出了一种新型沉积技术对铯原子尺寸进行操纵, 实验证明, 沉积原子的空间分布与驻波场的周期性、形状和方位密切相关^[5]。2011 年, NIKOLAI 等人将刀刃边缘放置在透镜的焦点附近, 利用衍射边缘产生的部分干涉图来测试光学表面的质量信息^[6]。2012 年, WANG 在 1 维铬原子沉

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11064002); 广西省自然科学基金资助项目(2012GXNSFAA053229; 2013GXNSFDA019002); 广西省科学研究与技术开发课题资助项目(桂科合 1346010-5); 桂林市科学研究与技术开发计划资助项目(20130122-1); 桂林电子科技大学创新团队基金资助项目

作者简介: 肖宇馨(1989-), 女, 硕士研究生, 现主要从事纳米光栅计量标准方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: glietzw@163.com

收稿日期: 2014-02-24; 收到修改稿日期: 2014-03-19

积的基础上,提出了一种能够判断激光驻波场与沉积基片相对位置的实验方法,该方法准确定位了驻波场到基片的距离^[7]。同年,ZHANG 等人以激光汇聚铬原子束沉积为例,对直边衍射高斯激光驻波场和光学势阱进行了仿真^[2,8],并研究了基片衍射效应对原子波包几率密度演化的影响^[9]。

本文中根据直边菲涅耳衍射的近似理论,利用设定适当步长的 4 阶龙格-库塔算法^[10],讨论了不同反射镜位置和激光束腰半径的条件下,铬原子在衍射扰动激光驻波场中的 3 维沉积特性,并比较了沉积条纹的半峰全宽和对比度的变化规律。

1 铬原子在衍射扰动驻波场中运动轨迹的计算模型

根据全反射原理,当入射波遇到反射镜后,产生反相并且强度与入射波相同的反射波,两列波叠加后就会形成衍射扰动驻波场^[11],假定激光束沿 x 方向传播,高度准直的铬原子束沿 z 方向运动,则光场强度为^[4]:

$$I(x, y, z) = [\bar{E}_1(x, y, z) + \bar{E}_2(x, y, z)] \times [\bar{E}_1(x, y, z) + \bar{E}_2(x, y, z)]^* \quad (1)$$

式中, $\bar{E}_1(x, y, z)$, $\bar{E}_2(x, y, z)$ 分别表示入射衍射场和反射衍射场的光场强度复振幅分布,* 代表共轭。衍射驻波场中稳态偶极势的表达式为^[12]:

$$U(x, y, z) = \frac{\hbar \delta}{2} \ln \left[1 + \frac{I(x, y, z)/I_s}{1 + (2\delta/\Gamma)^2} \right] \quad (2)$$

式中, $\hbar = h/(2\pi)$ 为普朗克常量, δ 为失谐量, Γ 为自然线宽, I_s 为原子饱和和吸收强度。根据拉格朗日方程可知,铬原子的运动轨迹可以表示为^[13]:

$$\begin{cases} a_x + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial x} = 0 \\ a_y + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y} = 0 \\ a_z + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, a_x, a_y, a_z 分别是原子在 x, y, z 方向上的加速度, m 是铬原子的质量。

$$a_x = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \frac{dz}{dt} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dz} \right) \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + \frac{dx}{dz} \frac{d}{dt} \left(\frac{dz}{dt} \right) = x'' v_z^2 + x' a_z \quad (4)$$

式中, x'' 和 x' 分别表示 x 的2阶导数和1阶导数。

同理可得:

$$a_y = y'' v_z^2 + y' a_z \quad (5)$$

式中, v_z 表示原子在 z 方向上的速率, y'' 和 y' 分别表示 y 的2阶导数和1阶导数。

又由于:

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dz} \frac{dz}{dt} = x' v_z \\ v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dz} \frac{dz}{dt} = y' v_z \end{cases} \quad (6)$$

式中, v_x, v_y 分别表示原子在 x, y 方向上的速率。且动能:

$$E = W - U = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (7)$$

式中, W 是原子的总能量。将(4)式~(7)式带入(3)式可得:

$$\begin{cases} x'' \frac{2(W-U)}{1+x'^2+y'^2} - x' \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \\ y'' \frac{2(W-U)}{1+x'^2+y'^2} - y' \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

采用数值算法对偶极势 U 的离散值求微分,通过 4 阶龙格-库塔算法对(8)式进行求解,计算出铬原子在衍射扰动场中的运动轨迹,并利用累计算法得到沉积条纹的 3 维结构特性。

2 结果与分析

在直边衍射激光驻波场中,将铬原子作为二能级原子进行处理,模拟分析中采用 $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ 跃迁的相关参量,其中共振激光波长 $\lambda = 425.55 \text{ nm}$,自然线宽 $\Gamma = 5 \times 2\pi \text{ MHz}$,饱和光强 $I_s = 85 \text{ W/m}^2$,激光场失谐量 $\delta = 200 \times 2\pi \text{ MHz}$,入射激光功率 $P = 3.2 \text{ mW}$ ^[14]。图 1 为基于菲涅耳直边衍射原理建立的模型示意图,其中 l 和 w_0 分别表示反射镜位置和高斯激光束腰尺寸。

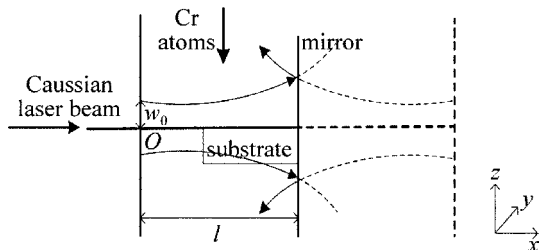


Fig. 1 Schematic diagram based on Fresnel straight edge diffraction

在菲涅耳直边衍射模型的基础上,图 2 中给出了不同 l 的条件下铬原子在衍射扰动场中的 3 维运动轨迹,其中 $w_0 = 100 \mu\text{m}$ 。由图 2 可以看出, $y = 0$ 平面铬原子的运动轨迹最密集,因此汇聚在基片表面的铬原子数最多。以 $y = 0$ 平面为中心两侧的运动轨迹呈对称分布,当 y 平面远离中心平面时,铬原

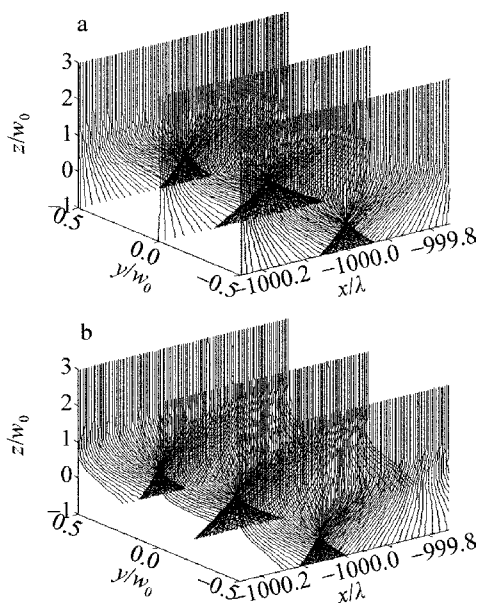


Fig. 2 3-D motion trail of Cr atoms
 a - $l=0\text{cm}$ b - $l=4\text{cm}$

子的运动轨迹逐渐稀疏,并且汇聚在基片表面的铬原子数逐渐减少。这是由于 $y=0$ 平面位于激光中心处,光强最强导致铬原子受到的偶极力最大,因此衍射驻波场对铬原子的汇聚作用也最显著。图 3 中给出了不同 l 的条件下铬原子沉积条纹的 3 维结构。由图 3 可以看出,铬原子的运动轨迹决定了沉积光栅的 3 维结构^[15]。当 $l=0\text{cm}$ 时,入射衍射场与反射衍射场完全重合,此时的衍射叠加场驻波效果最好;当 $l=4\text{cm}$ 时,入射衍射场与反射衍射场存在相位偏差,使得运动轨迹发生偏移,对应的沉积条

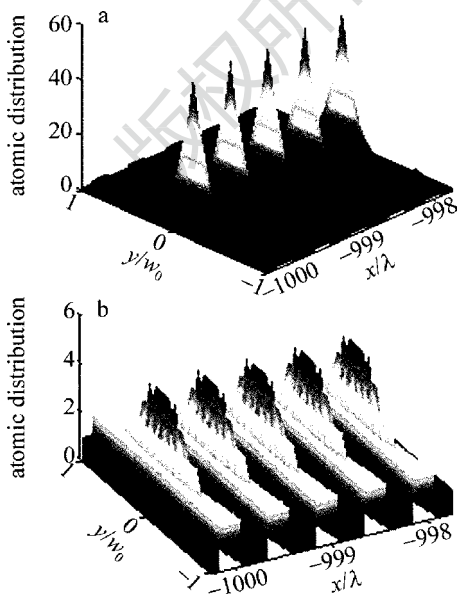


Fig. 3 Structure of 3-D deposition stripe
 a - $l=0\text{cm}$ b - $l=4\text{cm}$

纹的位置也发生改变,由于偶极力减弱并且分布不均匀,导致沉积到基片表面的铬原子数目减少, y 平面中心区域处的沉积条纹出现分裂状态,沉积光栅的基底变厚,最终沉积光栅质量严重恶化。

为了进一步明确 l 对衍射驻波场汇聚效果的影响,图 4 中给出了 l 与 $y=0$ 平面沉积条纹的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 及对对比度 C 之间的关系。当 $l=0\text{cm}$ 时, $y=0$ 和 $y=\pm 0.5w_0$ 平面沉积条纹的半峰全宽分别为 0.30nm 和 36.77nm ,对比度分别为 44.92 和 4 ; 而当 $l=4\text{cm}$ 时, $y=0$ 和 $y=\pm 0.5w_0$ 平面沉积条纹的半峰全宽分别增至 12.92nm 和 65.70nm ,对比度分别降为 5 和 3 。由此说明以 $y=0$ 平面为中心,两侧的沉积条纹半峰全宽逐渐增大,同时对对比度下降;随着 l 的增加,基片衍射效应的影响会逐渐减弱,最终沉积条纹的半峰全宽和对比度都趋于稳定。为了得到良好的沉积条纹,需要将反射镜置于激光束腰处。

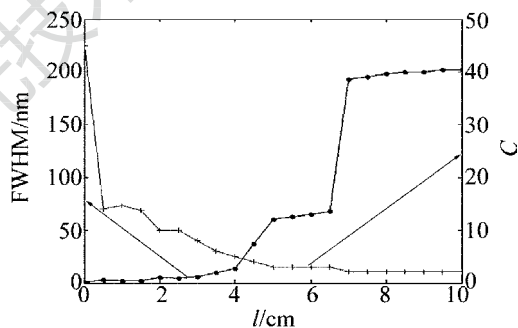


Fig. 4 Relation between FWHM and C under different parameter l

由图 1 可知,高斯激光束腰半径的变化将会改变入射光束和反射光束发生衍射处的光斑半径,在激光功率一定的条件下,衍射叠加场的最大光强就会随之变化。当 w_0 变化时,相应的 3 维运动轨迹和沉积条纹结构分别如图 5 和图 6 所示,其中反射镜位于激光束腰处。将图 2a 和图 5 进行比较发现,铬原子在基片上的沉积位置会受到激光束腰半径的影响。当 $w_0=30\mu\text{m}$ 时, $y=0$ 平面的铬原子将在衍射驻波场中心以下位置处汇聚,由于此时铬原子受到的偶极力较弱,而衍射效应的影响又比较大,导致 y 平面两侧的汇聚条纹与 $y=0$ 平面的汇聚条纹基本一致,沉积条纹质量严重恶化;随着 w_0 的增加, $y=0$ 平面的铬原子将在衍射驻波场中心位置处汇聚,并且汇聚能力逐渐增强,最终 y 平面的沉积结构呈现清晰的高斯轮廓分布;当 w_0 继续增加,铬原子受到的汇聚作用又逐渐减弱,基片衍射效应的影响也随之模糊。

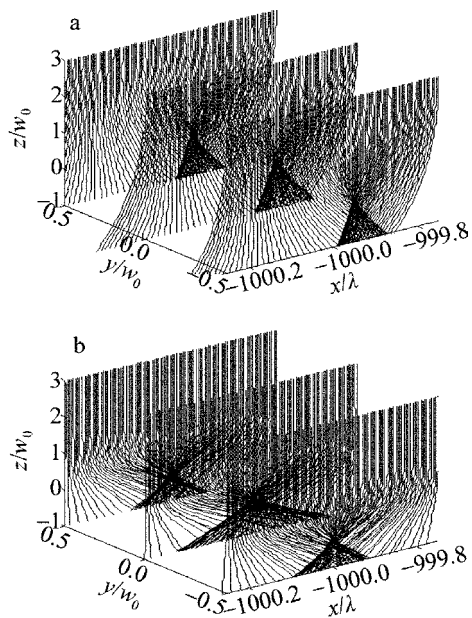


Fig. 5 3-D motion trail of Cr atoms
a — $w_0 = 30\mu\text{m}$ b — $w_0 = 200\mu\text{m}$

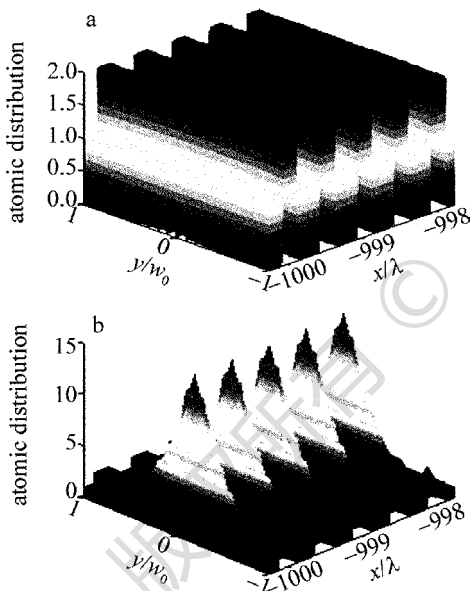


Fig. 6 Structure of 3-D deposition stripe
a — $w_0 = 30\mu\text{m}$ b — $w_0 = 200\mu\text{m}$

图 7 中给出了 w_0 与 $y = 0$ 平面沉积条纹的 FWHM 及对对比度之间的关系。当 $w_0 = 30\mu\text{m}$ 时, $y = 0$ 和 $y = \pm 0.5w_0$ 平面沉积条纹的 FWHM 分别为 110.10nm 和 114.48nm, 对比度都为 2; 当 $w_0 = 62.5\mu\text{m}$ 时, $y = 0$ 和 $y = \pm 0.5w_0$ 平面沉积条纹的 FWHM 分别降至 0.03nm 和 32.65nm, 对比度分别增为 322.14 和 4, 此时的 3 维沉积效果达到最佳; 当 $w_0 = 200\mu\text{m}$ 时, $y = 0$ 和 $y = \pm 0.5w_0$ 平面沉积条纹的 FWHM 分别增至 2.89nm 和 63.24nm, 对比度分别降为 13.56 和 3, 进一步验证了 $y = 0$ 平面的沉

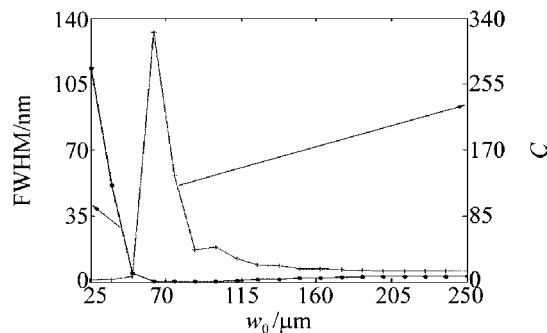


Fig. 7 Relation between FWHM and C under different parameter w_0
积条纹质量最好, 另外, 随着 w_0 的增加, 沉积条纹的 FWHM 和对比度也趋于稳定。

3 结 论

基于菲涅耳直边衍射理论, 推导出铬原子在衍射扰动场中的运动轨迹方程, 分别对不同反射镜位置和高斯激光束腰半径下的铬原子运动轨迹和沉积特征进行了仿真, 根据仿真结果, 研究了基片边缘对不同反射镜位置和激光束腰半径的影响程度, 比较了铬原子 3 维沉积条纹的 FWHM 和对比度, 并指出在实验中应适当地选择反射镜位置和激光束腰半径, 以期获得较好的沉积条纹。

参 考 文 献

- [1] SHI C Y, QIAN J, TAN H P, *et al.* Results from national institute of metrology in NANO_5 2-D grating comparison[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010(4):1-5 (in Chinese).
- [2] ZHANG B W, ZHI L X, ZHANG W T. Simulation of optical potential of Gaussian laser standing wave by diffraction of straight edge[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18):183201 (in Chinese).
- [3] ZHANG W T, LI T B. Atom lithography with a chromium atomic beam[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(11):2952-2955 (in Chinese).
- [4] KUMAR R, KAURA S K, SHARMA A K, *et al.* Knife-edge diffraction pattern as an interference phenomenon: an experimental reality[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(2):256-261.
- [5] TANTUSSI F, MANGASULI V, PORFIDO N, *et al.* Towards laser-manipulated deposition for atom-scale technologies[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(24):9665-9670.
- [6] NIKOLAI K, FERMÍN S G A, PEDRO C X, *et al.* Optical testing with a knife edge interferometer[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 274(1):012063.
- [7] WANG J B, QIAN J, YIN C, *et al.* Method of identifying the relative position between standing wave of laser light and substrate in atom lithography[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19):190601 (in Chinese).
- [8] ZHANG B W, MA Y, ZHANG P P, *et al.* Simulation of Gaussian laser standing wave based on diffraction by straight edge[J]. Laser Technology, 2012, 36(6):810-813 (in Chinese).
- [9] ZHANG B W, MA Y, ZHANG P P, *et al.* Effects of substrate dif-

- fraction on evolution of the atom wave-packet probability density in the focused laser standing wave[J]. *Acta Optica Sinica*,2012,32(12):1-7(in Chinese).
- [10] ZHANG B W, MA Y, LI T B, *et al.* Effect of laser power on one-dimensional deposition of chromium atomic beam[J]. *Acta Optica Sinica*,2009,29(2):421-424(in Chinese).
- [11] ZHANG B W, ZHI L X, ZHANG W T, *et al.* Effect of atomic velocity at substrate diffraction on laser-focused Cr atom deposition[J]. *Laser Technology*,2013,37(4):421-424(in Chinese).
- [12] ZHANG W T, ZHU B H. A novel method to realize the nanometer scale grid deposition[J]. *Acta Physica Sinica*,2010,59(8):5392-5396(in Chinese).
- [13] McCLELLAND J J. Atom-optical properties of a standing-wave light field[J]. *Journal of the Optical Society of America*,1995, B12(10):1761-1768.
- [14] ZHANG W T, ZHU B H, XIONG X M. Focusing characteristic of chromium atoms under elliptical standing wave[J]. *Acta Physica Sinica*,2009,58(12):8199-8204(in Chinese).
- [15] HUANG J, ZHANG W T, ZHU B H, *et al.* Characteristics of deposition for neutral atoms in laser standing wave with different velocities[J]. *Acta Physica Sinica*,2011,60(6):063202(in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©