

原子运动速度对激光驻波场作用下 纳米光栅沉积特性的影响*

张文涛¹⁾ 朱保华^{1)†} 熊显名¹⁾ 黄 静²⁾

1) (桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

2) (贵州民族学院科技处, 贵阳 550000)

(2010年7月21日收到; 2010年8月26日收到修改稿)

利用近共振激光驻波场操纵中性原子实现纳米光栅的沉积是一种新型的研制纳米结构方法, 处于激光驻波场中的原子运动速度特性对最终纳米光栅的沉积特性有着重要的影响. 利用半经典理论, 基于4阶 Runge-Kutta 算法进行了不同铬原子纵向和横向运动速度条件下纳米光栅结构沉积的仿真研究. 研究表明, 铬原子纵向速度为最大概率速度 960 m/s 时, 所形成的纳米光栅的半高宽为 1.49 nm, 对比度为 62.1:1, 当铬原子的纵向速度为半最大概率速度 480 m/s 时, 纳米光栅的半高宽为 5.35 nm, 对比度下降为 25.6:1. 同时, 对原子的横向速度影响沉积特性的研究表明, 当原子的横向运动速度为 0.25 m/s 时, 纳米光栅结构的半高宽为 4.18 nm, 条纹对比度为 20.9:1, 当原子的横向运动速度为 0.50 m/s 时, 纳米光栅结构的半高宽变为 58.4 nm, 条纹对比度减小为 8.9:1, 沉积条纹质量下降.

关键词: 原子光刻, 纳米计量, 激光驻波场, 纳米光栅结构

PACS: 32.80.pj, 42.50.Wk

1. 引言

沉积型纳米光栅制作的基本原理是利用特定空间分布激光驻波场的辐射压力控制原子运动, 使原子束的密度产生相应的空间分布, 而后直接沉积在基板上, 从而形成纳米光栅结构. 经过预先准直的原子束穿过与之正交的大失谐激光驻波场时, 由于激光驻波场在空间的光强分布不均匀而使中性原子受到非均匀的偶极力作用, 向驻波波峰或驻波波谷汇聚, 形成“原子束的沟道化”现象. 在该现象中, 原子束密度产生了以光波长的一半为周期的结构. 如果是沉积在基板上, 就会形成具有相同周期的条纹. 1 维条件下形成的是光栅, 2 维驻波场作用下则沉积出点阵结构^[1-4].

中性原子在激光驻波场的作用下将会按照特定的路径进行运动, 从而具有特定的运动轨迹, 原子的运动轨迹将直接决定着其沉积时在基板上的分布^[5], 即中性原子的运动轨迹将决定着所形成的

纳米光栅的基本特性, 故而研究中性原子在激光驻波场中的运动特性和运动轨迹具有非常重要的意义. 本文基于半经典理论为基础, 利用 4 阶 Runge-Kutta 算法对不同纵向速度和横向速度条件下中性铬原子在激光驻波场中的运动轨迹和沉积特性进行了仿真研究, 并对沉积结果进行了分析和对比.

2. 模型分析

高斯激光驻波场的光强分布可以表示为^[6]

$$I(x, z) = I_{\max} e^{(-2z^2/\omega_0^2)} \sin^2(kx), \quad (1)$$

其中, I_{\max} 为高斯光束中心光强, ω_0 为高斯激光束腰尺寸.

则高斯激光驻波场的稳态偶极势为

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

其中, Γ 为原子跃迁自然线宽, I_s 为原子饱和光强, Δ 为激光频率相对原子束共振频率的失谐量.

* 国家自然科学基金(批准号:11064002, 11061011)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: uestczrk@126.com

铬原子在高斯激光驻波场中的拉格朗日函数为

$$L = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{z}^2) - U(x, z), \quad (3)$$

其中 \dot{x}, \dot{z} 分别表示原子在 x, z 轴方向的速度, $U(x, z)$ 表示激光驻波场中铬原子的势能.

在铬原子聚焦沉积的过程中,只考虑偶极力的作用,则在整个过程中,原子的总能量保持不变,即认为它是一个保守系^[7-9].利用保守体系的拉格朗日方程有

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}}\right) - \frac{\partial L}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

化简(4),(5)式,得到原子在驻波场的运动方程为

$$\ddot{x} + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, z)}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$\ddot{z} + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, z)}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

由(6),(7)式可知

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dz} \frac{dz}{dt}\right) + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dz}\left(\frac{dx}{dz}\right)\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + \frac{dx}{dz} \frac{d}{dt}\left(\frac{dz}{dt}\right) + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

即

$$x''z^2 + x'z' + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial x} = 0. \quad (11)$$

其中 x' 是 x 对 z 的微分.另外有

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dz} \frac{dz}{dt} = x'z', \quad (12)$$

且动能为

$$T = E_0 - U(x, z) = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{z}^2), \quad (13)$$

其中 E_0 是原子的总能量.

将(12)式代入(13)式,有

$$\begin{aligned} E_0 - U(x, z) &= \frac{1}{2}m(x'^2 z'^2) \\ &= \frac{1}{2}mz'^2(1 + x'^2). \end{aligned} \quad (14)$$

将(7),(13)式代入(11)式可得

$$x'' \frac{2(E_0 - U)}{m(1 + x'^2)} + x' \left(\frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad (15)$$

将(15)式化简,得

$$x'' = \frac{1 + x'^2}{2(E_0 - U)} \left(x' \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial U}{\partial x} \right). \quad (16)$$

利用数值算法,通过设定适当步长的4阶 Runge-Kutta 算法对上述方程进行求解,计算原子在激光驻波场中的运动轨迹,继而通过累积方法得到原子在激光驻波场作用下沉积条纹的结构特性.

3. 实验系统及测量结果

3.1. 纵向速度对沉积结果的影响

入射原子的纵向速度 V_z 服从 Maxwell-Boltzman 分布,故有

$$P(V_z) = \frac{1}{2} \left(\frac{M}{k_B T} \right)^2 V_z^3 \exp\left(-\frac{MV_z^2}{2k_B T}\right), \quad (17)$$

其中 k_B 是 Boltzmann 常数,对于铬原子而言,在原子炉温为 1650°C 条件下的最大概率速率为 960 m/s.

图 1(a) 为中性铬原子的纵向运动速度为 960 ± 50 m/s 时的运动轨迹仿真图,图 1(b) 为中性铬原子的纵向运动速率度 480 ± 50 m/s 时的运动轨迹仿真图,图 1(c) 为铬原子纵向最大概率速度运动条件下的纳米沉积图,图 1(d) 为铬原子纵向非最大概率速度运动条件下的纳米沉积图.由两组图的比较可以看出,当铬原子的运动速率满足最大概率速度分布时,经过激光驻波场的汇聚,中性铬原子将被汇集在激光驻波场的波节位置,形成性能良好的纳米光栅结构,所形成的纳米条纹的半峰高宽为 1.49 nm,对比度为 62.1:1,而当中性铬原子的纵向速度偏离最大概率分布条件时(小于最大概率速度),由于运动速度较小,从而使得铬原子与激光驻波场的作用时间加长,导致铬原子在激光驻波场的作用之下将会往返运动,形成振荡方式的运动轨迹.激光驻波场中往返振荡运动的铬原子经过激光驻波场的作用后,将会产生多次汇聚,从而使得汇聚后的纳米光栅条纹变粗,对比度下降,使得纳米光栅的质量变差,在此条件下所形成的纳米沉积条纹的半峰高宽为 3.35 nm,其对比度下降为 26.5:1,由此可以看出,当中性铬原子的纵向运动速度为最大概率速度时,经过激光驻波场的作用所形成的纳米条纹具有良好的沉积特性,而当中性铬原子的纵向速度偏离最大概率速度时,所形成的纳米条纹的质量将会产生恶化,即条纹半峰高宽增大、条纹对比度减小.

3.2. 横向速度对沉积结果的影响

入射原子的横向速度分布服从高斯分布,可表

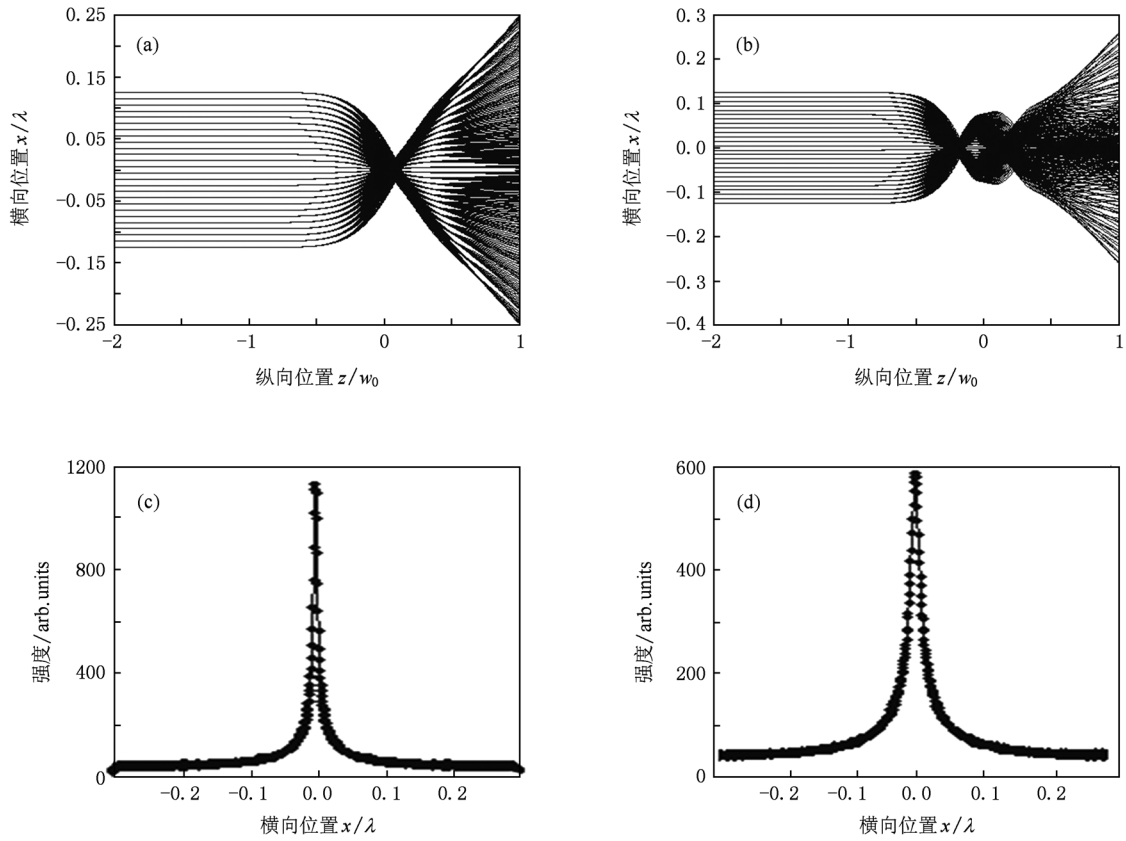


图1 原子纵向速度对运动过程和沉积结果的影响 (a)原子纵向速度最大概率分布的运动轨迹,(b)原子纵向速度半最大概率分布的运动轨迹,(c)原子纵向速度最大概率分布的沉积结果,(d)原子纵向速度半最大概率分布的沉积结果

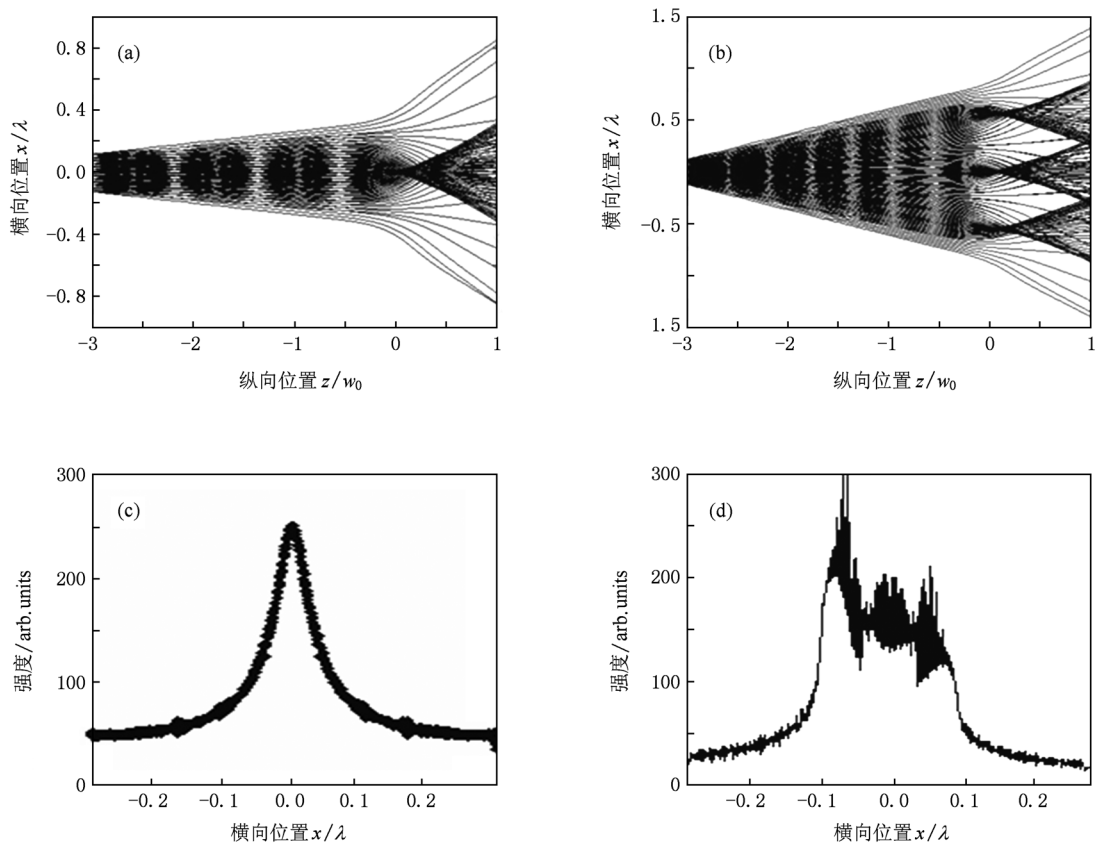


图2 原子横向速度对运动过程和沉积结果的影响 (a)横向运动速度为0.25 m/s时的运动轨迹;(b)横向运动速度为0.50 m/s时的运动轨迹;(c)横向运动速度为0.25 m/s时的沉积结果;(d)横向运动速度为0.50 m/s时的沉积结果

示为

$$P(V_x) = \sqrt{\frac{M}{2\pi k_B T_c}} \exp\left(-\frac{MV_x^2}{2k_B T_c}\right), \quad (18)$$

其中 T_c 为原子束的横向温度.

图 2 给出了不同原子横向速度分布条件下中性铬原子在激光驻波场中的运动轨迹河沉积结果仿真. 图 2(a) 为中性铬原子横向运动速度为 0.25 m/s 时的运动轨迹仿真图, 图 2(b) 为中性铬原子横向运动速度为 0.50 m/s 时的运动轨迹仿真图, 图 2(c) 为铬原子横向运动速度为 0.25 m/s 条件下经过激光驻波场作用后的纳米沉积图, 图 2(d) 为铬原子横向运动速度为 0.50 m/s 条件下经过激光驻波场作用后的纳米沉积图. 由两组图的比较可以看出, 随着铬原子横向速度的增大, 其运动轨迹也逐渐偏离激光驻波场的波节位置, 从而导致了沉积条纹质量逐渐变差以至于出现多次沉积现象. 当铬原子的横向运动速度为 0.25 m/s 时, 所形成的纳米条纹的半

高宽为 2.18 nm, 条纹对比度为 20.9:1, 当铬原子的横向运动速度增大至 0.50 m/s 时, 得到沉积条纹半高宽增大至 58.4 nm, 条纹对比度减小为 8.9:1, 且有呈现双峰的趋势.

4. 结 论

详细分析了激光驻波场作用下中性铬原子的偶极力特性, 以半经典理论为基础进一步分析了中性铬原子在激光驻波场作用下的运动特征, 分别对不同纵向运动速度和横向运动速度条件下的铬原子运动轨迹进行了仿真, 并利用累计算法实现了不同纵向速度和横向速度条件下中性铬原子的沉积特征仿真. 根据仿真结果, 分析了不同纵向速度和横向速度条件下中性铬原子沉积条纹的半峰高宽和对度特性, 指出了纵向运动速度和横向运动速度对原子束沉积所产生的影响.

- [1] Li T B 2005 *Shanghai Measurement Testing* **185** 8 (in Chinese) [李同保 2005 上海计量测试 **185** 8]
- [2] Cai W Q, Li C W, Huo Y S 1994 *Acta Phys. Sin.* **48** 611 (in Chinese) [蔡惟泉、李传文、霍芸生 1994 物理学报 **48** 611]
- [3] Timp G L, Behrenger R L, Tennant D M 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 1636
- [4] McClelland J J 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1761
- [5] Yan H, Tang G Q, Shi T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 023204

- [6] Wang Z L, Y J P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2466
- [7] Fioretti A, Camposo A, Tantussi F 2005 *Appl. Surf. Sci.* **248** 196
- [8] He M, Wang J, Zhan M S 2003 *Chin. Opt. Lett.* **1** 497
- [9] Zheng C L, Li T B, Ma Y, Zhang B W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4528 (in Chinese) [郑春兰、李同保、马 艳、张宝武 2006 物理学报 **55** 4528]

Characteristics of deposition for neutral atoms in laser standing wave with different velocities^{*}

Zhang Wen-Tao¹⁾ Zhu Bao-Hua^{1)†} Xiong Xian-Ming¹⁾ Huang Jing²⁾

1)(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

2)(Division of Research Administration, Guizhou University for Nationalities, Guiyang 550000, China)

(Received 21 July 2010; revised manuscript received 26 August 2010)

Abstract

The deposition patterns of neutral chromium atoms in a laser standing wave with different longitudinal and transverse velocities are discussed. The simulation results of atoms show that the full width at half maximum (FWHM) of a nanometer stripe is 1.49 nm and the contrast is 62.1:1 when the ideal longitudinal velocity of chromium atom is the most probable velocity 960 m/s, the FWHM of the stripe is 5.35 nm and the contrast is 25.6:1 when the longitudinal velocity of chromium atom is half the most probable velocity. The simulation results of deposition with different transverse velocities are shown at the same time, the FWHM of the stripe is 4.18 nm and the contrast is 20.9:1, with the transverse velocity of chromium atom being 0.25 m/s; the FWHM of the stripe is 58.4 nm and the contrast is 8.9:1, with the transverse velocity of chromium atom being 0.50 m/s.

Keywords: atom lithography, nano metrology, laser standing wave, nanometer stripe

PACS: 32.80.pj, 42.50.Wk

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11064002, 11061011).

[†] Corresponding author. E-mail: uestczrk@126.com