

沟道效应作用下中性原子在激光驻波场中的沉积特性研究*

张文涛 朱保华[†] 汪杰君 熊显名 黄雅琴

(桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

(2013 年 8 月 19 日收到; 2013 年 9 月 15 日收到修改稿)

基于半经典理论, 建立了中性原子与激光驻波场相互作用的模型, 分析了中性原子在激光驻波场沟道效应作用下运动轨迹及沉积特性, 探讨了球差、色差和原子束发散角对沉积条纹的影响. 得到了上述三种影响因素下纳米光栅的半高宽分别为 0.532, 12.16, 96.70 nm. 仿真结果表明, 随着原子束发散角度的增加, 沉积条纹的对比度将会下降, 当原子束发散角分别为 0.1 mrad 时, 其对比度为 85.2:1, 发散角为 0.3 mrad 时, 条纹对比度为 5.33:1, 而当发散角增加至 0.5 mrad 以上时, 沉积条纹将会出现分裂现象, 导致条纹的恶化.

关键词: 激光驻波场, 纳米光栅, 沟道效应

PACS: 32.80.Qk, 42.50.Wk

DOI: 10.7498/aps.62.243201

1 引言

近共振激光驻波场操纵中性原子沉积技术是一项新颖的研制纳米光栅结构的方法. 该技术的基本原理是利用空间特定分布的激光驻波场的辐射压力控制中性原子的运动特征, 继而实现具有周期性的纳米栅结构的沉积. 如图 1 所示, 高度准直的中性原子束经过与之正交的激光驻波场时, 由于该驻波场的空间光强的不均匀分布, 使得中性原子受到了驻波场非均匀偶极力的作用, 从而向激光驻波场的波峰或波谷位置进行汇聚, 形成了“原子束沟道化”现象. 该现象中, 在激光驻波场的操纵下, 中性原子束的密度是以光波长的一半为周期的, 当原子沉积在基板上时, 就形成了具有半波长周期的纳米栅结构^[1].

国外研究中, 1992 年, Prentiss^[2] 研究小组通过实验手段证实了原子沟道化效应; 1999 年, Anderson^[3] 研究小组基于沟道化效应进行了激光汇聚中性铬原子的实验; 2004 年, Campose^[4] 研究

小组进行了利用原子沟道化效应进行激光汇聚中性铯原子的实验, 并进行了相应的计算机仿真分析.

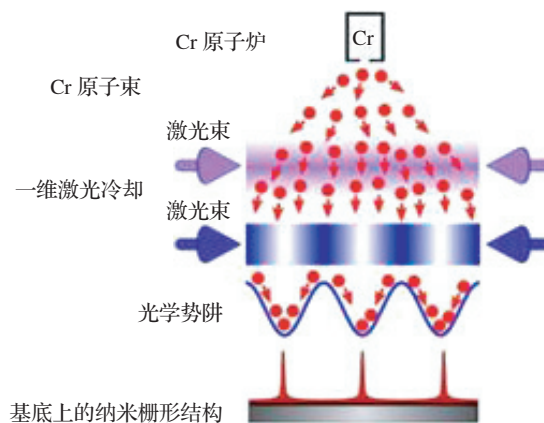


图 1 激光驻波场汇聚原子沉积纳米光栅示意图

国内研究中, 1990 年蔡惟泉^[5] 研究小组进行了氩原子激光汇聚实验, 实验中观察到了由于铯原子的沟道化效应所造成的聚束现象; 2003 年詹明生^[6] 研究小组对激光驻波场作用下铷原子的沟道化效应进行了深入的分析; 同年, 陈旭南^[7] 研究小

* 国家自然科学基金 (批准号: 11064002)、广西自然科学基金 (批准号: 2012 GXNSFAA053229, 2013 GXNSFDA019002)、广西科学研究与技术开发课题 (批准号: 桂科合 1346010-5)、桂林市科学研究与技术开发计划 (批准号: 20130122-1) 和桂林电子科技大学创新团队基金资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: uestczrk@126.com

组利用半经典理论对中性原子在激光驻波场中的沟道化效应进行了计算机仿真分析; 2011 年李同保^[8] 研究小组实现了原子沟道化计算机仿真, 分析了原子纵向速度对沟道化过程的影响; 2012 年张文涛^[9,10] 研究小组分析了理想激光驻波场原子束发散角对纳米光栅沉积的影响, 通过仿真得到了原子束发散角分别为 0.2, 0.5 和 1.0 mrad 条件下铬原子的运动轨迹及沉积特性. 在文献 [9] 的基础上, 本文进一步探讨了沟道效应 (激光功率较大条件下) 的作用以及对中性原子沉积过程的影响, 实现了沟道效应机制下球差、色差、原子束发散及综合因素影响中性原子沉积的特点.

2 模型分析

由于激光驻波场与中性原子相互作用过程中, 在 y 方向的作用力具有平移对称性, 故在后续的讨论分析过程中可以忽略 y 方向的情况, 从而将激光驻波场中原子的运动问题简化为中性原子的二维运动过程.

高斯激光驻波场的光强分布可以表示为

$$I(x, z) = I_{\max} e^{(-2z^2/w_0^2)} \sin^2(kx), \quad (1)$$

式中, I_{\max} 为高斯光束中心光强, w_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

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

式中, 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.

根据保守系的拉格朗日方程可知原子在高斯激光驻波场中的三维运动方程为

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

其中 \dot{x} , \dot{y} , \dot{z} 分别表示原子在 x , y , z 方向上的速度. 那么

$$\begin{cases} x''\dot{z}^2 + x'\dot{z} + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial x} = 0, \\ y''\dot{z}^2 + y'\dot{z} + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y} = 0; \end{cases} \quad (4)$$

又由于

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dz} \frac{dz}{dt} = x'\dot{z}, \\ \dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dz} \frac{dz}{dt} = y'\dot{z}, \end{cases} \quad (5)$$

其中 x' , y' 分别是 x 和 y 对 z 的微分; 此时有

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dx'\dot{z}}{dt} = \dot{z} \frac{dx'}{dt} + x' \frac{d\dot{z}}{dt} = \dot{z}^2 x'' + x' \ddot{z}, \\ \ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dy'\dot{z}}{dt} = \dot{z} \frac{dy'}{dt} + y' \frac{d\dot{z}}{dt} = \dot{z}^2 y'' + y' \ddot{z}. \end{cases} \quad (6)$$

在保守偶极力作用下, 原子的总能量 E_0 可以由下式来表示:

$$E_0 = T + U = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + U(x, y, z). \quad (7)$$

一般情况下 $T \gg U$, 所以 $E_0 = T$, 在近轴近似下可以得到:

$$\begin{cases} x'' \frac{2(E_0 - U)}{m(1 + x'^2 + y'^2)} + x' \left(-\frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \\ y'' \frac{2(E_0 - U)}{m(1 + x'^2 + y'^2)} + y' \left(-\frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

可以利用各种数值算法对 (8) 式进行求解, 对铬原子在高斯激光驻波场中的沉积特性进行各种分析.

3 仿真结果与分析

当中性原子束进入激光驻波场并与之相互作用时, 由于激光驻波场是周期性变化的, 偏离中心位置较远入射的原子, 经过激光驻波场的汇聚后并没有到达驻波场的焦点位置, 而是偏离了该汇聚焦点. 这种现象的出现正是原子受到了球差的影响所致, 在激光驻波场中远离光轴的原子在激光驻波场中受到的力要比中轴线上原子所受到的力小, 故此这些原子将会出现弥散, 偏离了汇聚场的焦点. 同时, 铬原子是一热原子束, 故此在纵向和横向上均有一定的速度分布. 热原子束在纵向上的速度服从 Maxwell-Boltzman 分布, 不同速度的入射原子经过激光驻波场的汇聚后, 并不交于光轴的同一点, 而是分布在某一个区域内, 即其焦距长度会有一定的变化范围, 这对应于粒子光学中的色差. 色差将在一定程度上影响着激光驻波场对原子汇聚的特性.

为描述沉积条纹的沉积特性,引入对比度的概念.定义条纹的最高度和条纹基底厚度直边为沉积条纹的对比度,表达式为 $V = H_{\text{条纹}}/H_{\text{基底}}$.

图2给出了在原子沟道化效应作用下中性原子经过激光驻波场偶极力的作用后的运动轨迹.可以看出,由于受到原子沟道化效应的影响,经由激光驻波场的作用后中性原子形成多次汇聚的现象,使得在沉积基板上形成多次沉积会导致纳米光栅的半高宽展宽和对比度降低,从而影响了所形成的纳米光栅的沉积质量.

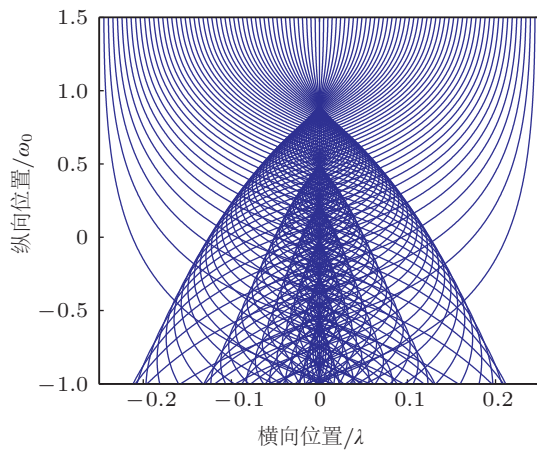


图2 激光驻波场作用下原子沟道化现象

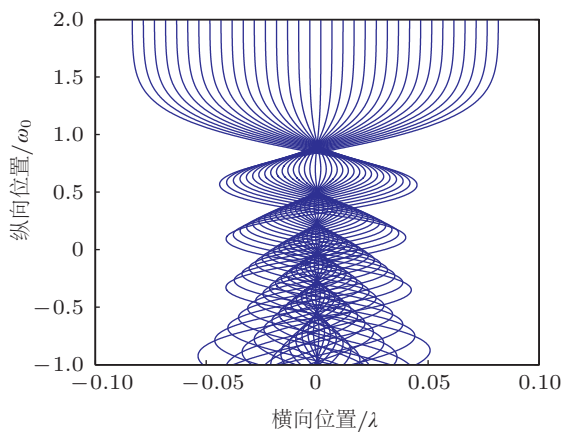


图3 原子沟道化作用下中性原子的运动轨迹(球差作用)

图3—6给出了不同影响因素条件下中性原子经过激光驻波场偶极力的作用后的运动轨迹.由于球差、色差及发散角形成的机制不同,从而三者在对中性原子沉积过程中的作用是相互独立的.同时可以得到,三者的影响中,原子束发散角对中性

原子的运动轨迹影响最大,为获得性能良好的纳米光栅沉积,需要高准直度的中性原子束作为基础.

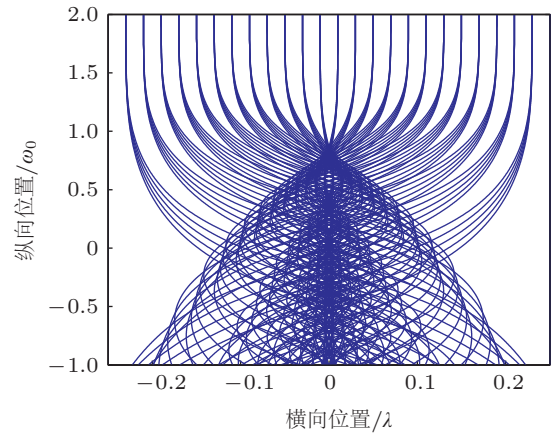


图4 原子沟道化作用下中性原子的运动轨迹(色差作用)

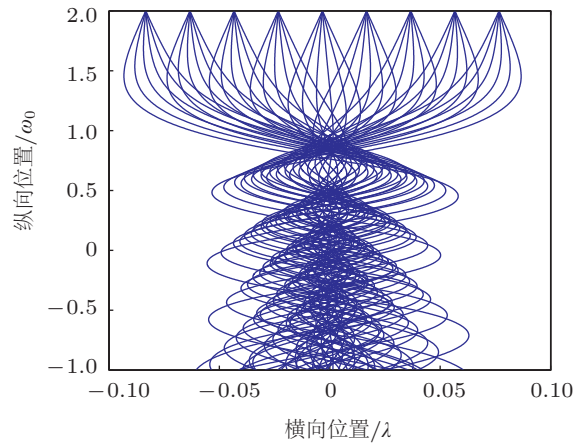


图5 原子沟道化作用下中性原子的运动轨迹(发散角作用)

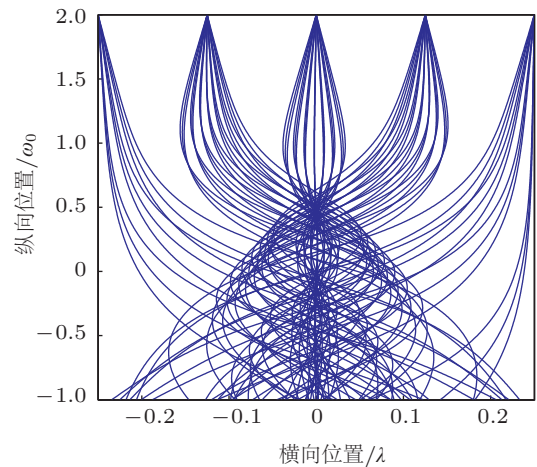


图6 原子沟道化作用下中性原子的运动轨迹(综合作用)

图7—10给出了不同影响因素条件下,中性原子经由沟道效应激光驻波场作用下的纳米光栅沉积特性.图7为发散角 0.1 mrad 时,在球差的影响下,经由沟道效应激光驻波场作用后,纳米光栅的半高宽为 0.532 nm ,条纹对比度为 85.2 .图8为发散角 0.3 mrad 时,在色差的作用下,经由沟道效应激光驻波场作用后,其沉积所形成的纳米光栅的半高宽增大为 12.16 nm ,对比度降低为 5.33 .而随着原子束的发散,在沟道效应的作用下,沉积条纹呈

现出分裂现象,如图9所示,使得沉积条纹的质量大大降低,在 0.5 mrad 发散角条件下,中心位置沉积条纹的半高宽展宽为 96.7 nm .图10给出了上述三种因素综合影响下纳米光栅沉积条纹的特征.从上述的仿真结果可知,在三种主要影响因素中,原子束发散角对沉积结果的影响最大,为此在进行纳米光栅沉积过程中,需要高准直度的中性原子束作为基础.

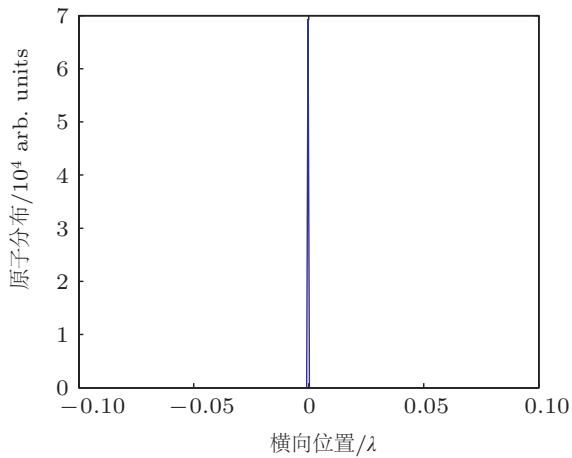


图7 原子沟道化作用下中性原子的沉积(球差作用)

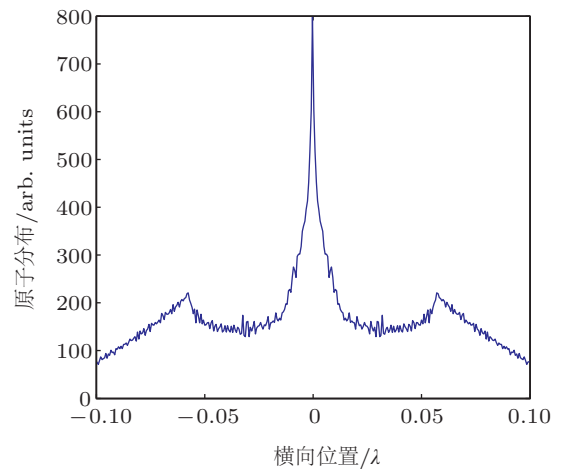


图8 原子沟道化作用下中性原子的沉积(色差作用)

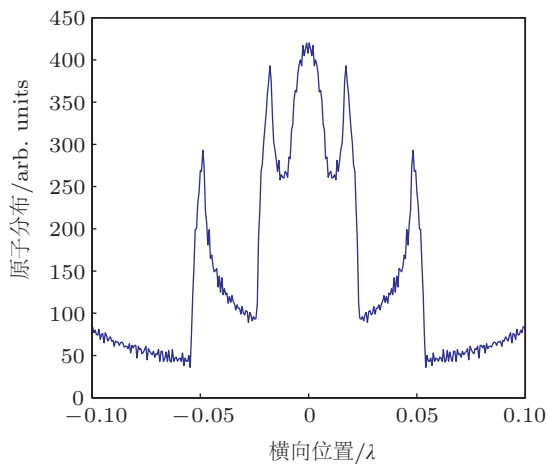


图9 原子沟道化作用下中性原子的沉积(发散作用)

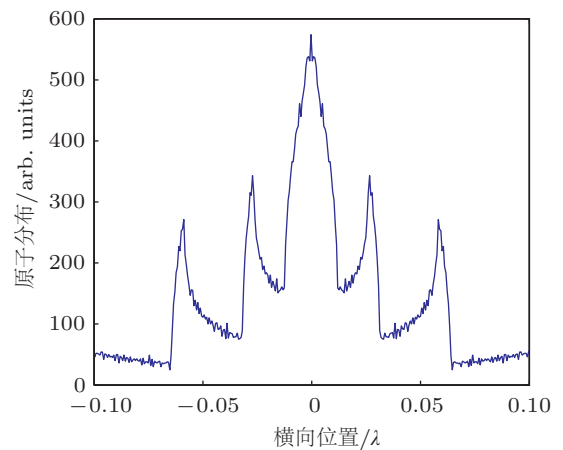


图10 原子沟道化作用下中性原子的沉积(综合作用)

4 结 论

基于沟道效应,分析了激光驻波场作用下中性

原子的运动轨迹及沉积过程,得到了沉积结构的半高宽及对比度特征,通过仿真分析得出了在沟道效应影响下,要实现性能良好的纳米光栅沉积,原子束的发散角应小于 0.5 mrad .

- [1] Zhang W T, Zhu B H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5392 (in Chinese) [张文涛, 朱保华 2010 物理学报 **59** 5392]
 [2] Prentiss M, Timp G, Bigelow N 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 1027
 [3] Anderson W R, Brandley C C, McClelland J J 1999 *Phys. Rev. A* **59** 2476
 [4] Camposio A, Cervelli F, Tantussi F 2003 *Mater. Sci. Engineer. C* **23** 1087
 [5] Cai W Q, Li Q W 1994 *Acta Phys. Sin.* **48** 611 (in Chinese) [蔡惟泉, 李全文 1994 物理学报 **48** 611]
 [6] He M, Wang J, Zhan M S 2003 *Chin. Opt. Lett.* **1** 497
 [7] Chen Y P, Chen X N, Li Z 2003 *Micronanoelectron. Technol.* **7** 546 (in Chinese) [陈元培, 陈旭南, 李展 2003 微纳电子技术 **7** 546]
 [8] Lu X D, Li T B, Ma Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 123201
 [9] Zhang W T, Zhu B H, Huang J, Xiong X M, Jiang Q B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 033301
 [10] Zhang W T, Zhu B H, Xiong X M 2012 *Chin. Phys. Lett.* **32** 033301

Characteristics of neutral atom deposition under channel effect in a laser standing wave field*

Zhang Wen-Tao Zhu Bao-Hua[†] Wang Jie-Jun Xiong Xian-Ming Huang Ya-Qin

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

(Received 19 August 2013; revised manuscript received 15 September 2013)

Abstract

Based on semi-classical theory, a model of the interaction between neutral atoms and the laser standing wave field is established in this paper. The trajectories and the deposition characteristics are analyzed under channel effect, and the values of full width at half maximum of nano-grating are 0.532, 12.16 and 96.70 nm when the divergence angle, spherical and chromatic aberration are discussed, respectively. The simulation results show that the contrast of the stripe decreases with the increasing of divergence angle of the atomic beam. Also, the contrasts of the stripe are 85.2 : 1 and 5.33 : 1 when the divergence angles equal 0.1 and 0.3 mrad. When divergence angle increases over 0.5 mrad, the splitting of the stripe takes place, leading to the degradation of the deposition.

Keywords: laser standing wave field, nano-grating, channel effect

PACS: 32.80.Qk, 42.50.Wk

DOI: 10.7498/aps.62.243201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11064002), the Natural Science Foundation of Guangxi, China (Grant Nos. 2012 GXNSFAA053229, 2013 GXNSFDA019002), the Science Research and Technology Development Project of Guangxi, China (Grant No. 1346010-5), the Science Research and Technology Development Program of Guilin City, China (Grant No. 20130122-1), and the Program for Innovation Research Team of Guilin University of Electronic Technology, China.

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