

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*

张文涛^{1)†} 朱保华¹⁾ 黄静²⁾ 熊显名¹⁾

1) (桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

2) (贵州民族学院物理电子学院, 贵阳 550000)

(2010年9月29日收到; 2010年12月10日收到修改稿)

分析了椭圆激光驻波场的偏斜对中性原子运动过程和沉积过程的影响, 对不同偏斜角度椭圆激光驻波场作用下中性铬原子沉积纳米光栅结构的特性进行了仿真研究, 由仿真结果可以看出, 随着偏斜椭圆形激光束偏斜角的增加, 对应于不同 y 平面, 激光驻波场汇聚中性原子所形成纳米光栅条纹的对比度不断减小、半高宽不断增大. 当椭圆长短轴之比为 2:1 条件下, 椭圆激光驻波场的偏斜角为 0° 时, 纳米光栅的条纹半高宽为 3.2 nm, 条纹对比度为 36:1, 而当偏斜角为 15° 时, 激光驻波场中心位置处的沉积条纹的半高宽为 6.5 nm, 条纹对比度为 24:1, 而当椭圆激光驻波场偏斜角度达到 30° 时, 沉积条纹的单峰结构将会产生分裂, 形成了双峰结构, 且随着偏斜角的增加, 沉积条纹的分裂越严重, 纳米光栅的沉积质量越差. 对于其他长短轴比例条件下的激光场亦可根据比例关系获得相应的纳米光栅沉积特性.

关键词: 原子光刻, 偏斜椭圆激光驻波场, 纳米光栅

PACS: 32. 80. Pj, 42. 50. Vk

1. 引言

激光驻波场操纵和汇聚中性原子, 实现纳米光栅沉积的沉积型原子光刻是一项基础性研究和高新工艺相结合的技术, 该技术的基本原理是利用共振激光驻波场的辐射压力使得高准直中性原子束的密度在空间产生周期性的分布, 继而在基板上沉积形成纳米量级光栅结构^[1].

利用激光驻波场操纵中性原子实现纳米光栅沉积的条纹质量在很大程度上将受到激光驻波场特性的影响. 为了获得性能良好的纳米光栅结构, 必须要确定和优化纳米光栅结构制备过程中的激光驻波场的各项参数, 探讨和分析中性原子与激光驻波场相互作用过程中所体现出来的相关特性, 以及在不同激光驻波场参数下中性原子的运动轨迹特征等, 以此为基础实现最佳激光驻波场优化参数的选择^[2,3]. 铬原子纳米光栅的实验制作过程中, 经由钛宝石激光器 MBR-110 出射的激光束进入激光

倍频器 MBR-200. 为了获得激光驻波场和激光冷却场, 将 MBR-200 出射的高斯光束入射至一声光调制器 1250C-829A, 该声光调制器的零级和一级衍射光分别作为激光驻波场和激光冷却场的光源, 零级光与一级光的夹角为 27.4 mrad, 其基本结构参见参考文献[4]. 图 1 给出了激光驻波场变化的示意图, 图中 x 方向表示激光驻波场的入射方向, y 方向表示原子束的传输方向, 虚线圆表示理想的高斯光斑分布, 偏斜椭圆表示高斯光斑经过声光调制器及光学元件作用后的变形和偏斜. 根据理论分析, 通过圆柱透镜后的高斯光束将变形为椭圆高斯光束, 同时, 实验过程中发现, 倍频后的激光束经过声光调制器、诸多的光学透镜作用后, 往往由出射的高斯光束畸变为椭圆形高斯光束, 而在位置的传递过程中, 该椭圆形高斯光束在空间将会发生偏斜, 而上述的光束变形和偏斜都很难通过光路整形加以弥补, 故此激光驻波场的变形和偏斜将直接影响到纳米光栅沉积的特性. 由于声光调制晶体的热效应呈现椭圆分布, 且其对所传输光束的影响与该晶体的

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

† E-mail: uestczrk@126.com

尺寸成比例^[5], 而实验中声光调制器 1250C-829A 的长宽之比为 2:1, 导致了椭圆激光束的长轴和短轴之比亦约为 2:1. 经过实验测定, 激光驻波场的偏斜角度受到声光调制器和诸多光学平面镜的影响, 其偏斜角一般在 20°—40°之间. 由此进入真空室和中性原子相互作用时变化为偏斜的椭圆高斯光束, 故此激光驻波场与中性原子相互作用沉积纳米光栅的实质往往表现为偏斜椭圆激光驻波场操纵和汇聚中性原子, 实现纳米光栅的沉积. 如要实现椭圆光束的整形, 获得性能良好的高斯型激光束, 必须要在原光路中增加相应的柱面透镜等光学元件, 这些光学元件的加入, 必然将会导致激光束能量的衰减, 从而使得激光驻波场能量下降, 造成原子沉积激光功率的不足, 影响沉积效果. 基于前述分析, 研究和分析中性原子在偏斜椭圆激光驻波场作用下的运动特性和沉积特性具有重要的意义, 研究结果将会对纳米光栅的沉积制作提供良好的理论指导和参数依据.

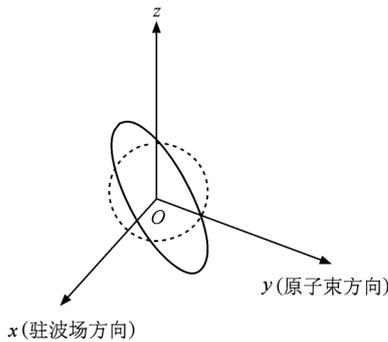


图1 激光驻波场变化示意图

2. 偏斜椭圆激光驻波场的计算模型分析

对于高斯激光驻波场, 其空间光强分布可表示为^[6]

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

式中 I_{\max} 为高斯光束中心处的最大光强, ω_0 为高斯光束腰斑半径. 则该高斯激光驻波场的空间光强分布函数 $G(x, y, z)$ 可表示为

$$G(x, y, z) = \exp(-2y^2/\omega_y^2 - 2z^2/\omega_z^2) \times \sin^2(kx). \quad (2)$$

于是, 椭圆形激光驻波场的光强空间分布函数 $G(x, y, z)$ 可表示为

$$G(x, y, z) = \exp(-2y^2/\omega_y^2 - 2z^2/\omega_z^2) \times \sin^2(kx), \quad (3)$$

其中 ω_z, ω_y 为椭圆形高斯光束在 z 方向和 y 方向上腰斑半径. 若该椭圆形激光驻波场在 yoz 平面内偏斜了一定的角度, 如顺时针转动了 θ , 则在发生偏斜之后的椭圆形激光驻波场光强空间分布函数 $G(x, y, z)$ 可以用如下式子进行表示:

$$G(x, y, z) = \exp \left[-2 \frac{(y \cos \theta + z \sin \theta)^2}{\omega_y^2} - 2 \frac{(y \sin \theta - z \cos \theta)^2}{\omega_z^2} \right] \sin^2(kx). \quad (4)$$

当系统达到稳态时, 激光驻波场的势阱深度为^[7]

$$U(x, y, z) = \frac{\hbar \delta}{2} \ln[1 + p(x, y, z)], \quad (5)$$

其中

$$p(x, y, z) = \frac{I(x, y, z)}{I_s} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4\delta^2} = p_0 G(x, y, z),$$

$$p_0 = \frac{I_0}{I_s} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4\delta^2},$$

则原子在该偏斜椭圆激光驻波场中的运动方程可以表示为

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

其中 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 分别表示原子在三个方向上的速度. 于是可以得到

$$\begin{aligned} x''z^2 + x'z' + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial x} &= 0, \\ y''z^2 + y'z' + \frac{1}{m} \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

又由于

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dz} \frac{dz}{dt} = x'z', \\ \dot{y} &= \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dz} \frac{dz}{dt} = y'z', \end{aligned} \quad (8)$$

其中 x', y' 分别是 x 和 y 对 z 的微分.

由于沿着 y 轴方向的光强梯度变化远小于驻波场 x 轴方向的光强梯度变化^[8], 故此在 y 轴方向的作用力较小, 接下来的计算中暂不考虑 y 方向对计算结果的影响. 计算过程中所采用的参数分别为: 椭圆形激光驻波场腰斑尺寸为 $\omega_y \times \omega_z = 200 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 激光驻波场的波长为 $\lambda = 425.55 \text{ nm}$. 对于中性铬原子而言, 其自然线宽 $\Gamma/2\pi = 5 \text{ MHz}$, 饱

和强度 $I_s = 85 \text{ W/m}^2$, 激光驻波场的失谐量为 $\delta = +200 \text{ MHz}$.

3. 模拟结果与分析

经过原子炉的喷射而形成的铬原子源属于热原子束,在其运动方向的 y 方向传输,该方向上铬原子束的运动速度符合麦克斯韦-玻尔兹曼分布,即有

$$\rho_o(v_y) = \frac{1}{2} \left(\frac{M_a}{k_B T_0} \right)^2 v_y^3 \exp\left(-\frac{M_a v_y^2}{2k_B T_0}\right), \quad (9)$$

式中 k_B 是 Boltzman 常数, M_a 为铬原子质量, T_0 为原子炉工作温度. 在 $1650 \text{ }^\circ\text{C}$ 工作条件下,原子的纵向最可几速率为 $v_y \approx 960 \text{ m/s}$. 而沿激光驻波场传播的 x 方向,热铬原子束的横向速度分布符合高斯分布,即有

$$\rho_c(v_x) = \sqrt{\frac{M_a}{2\pi k_B T_c}} \exp\left(-\frac{M_a v_x^2}{2k_B T_c}\right). \quad (10)$$

利用四阶龙格算法求解对于某一初始位置的原子,经过激光驻波场的作用后的末位置,通过追踪 64000 条随机入射的原子轨迹,利用累计方法得到激光驻波场汇聚铬原子所形成的汇聚条纹的相关特性^[5]. 图 2 给出了在 $\theta = 15^\circ$ 条件下,激光驻波场汇聚中性原子所形成的纳米光栅条纹的特性,图 2(a) 为纳米光栅条纹的三维结构,图 2(b) 给为不同 y 平面上所形成的汇聚条纹对比. 图中的纵坐标表示某一位置处铬原子沉积的数目分布,即铬原子的累积数目,下同.

图 3 给出了当 $\theta = 30^\circ$ 条件下,椭圆形激光驻波场汇聚铬原子所形成的条纹特性,图 3(a) 给出了汇聚条纹的三维结构,图 3(b) 给出了不同 y 平面上所形成的汇聚条纹对比.

图 4 给出了当 $\theta = 45^\circ$ 条件下,椭圆型激光驻波场汇聚铬原子所形成的条纹特性,图 4(a) 给出了汇聚条纹的三维结构,图 4(b) 给出了不同 y 平面上所形成的汇聚条纹对比.

比较图 2,3 和 4 可知,随着偏斜椭圆形激光束偏斜角的增加,对应于不同 y 平面,激光驻波场汇聚中性原子所形成纳米光栅条纹的对比度不断减小、半高宽不断增大. 并且,当激光束的偏斜角度增大到一定程度时, y 平面中心区域处的沉积条纹会呈现出分裂状态,从而造成沉积条纹的严重恶化. 如当偏斜角为 15° 时,激光驻波场中心位置处的沉积

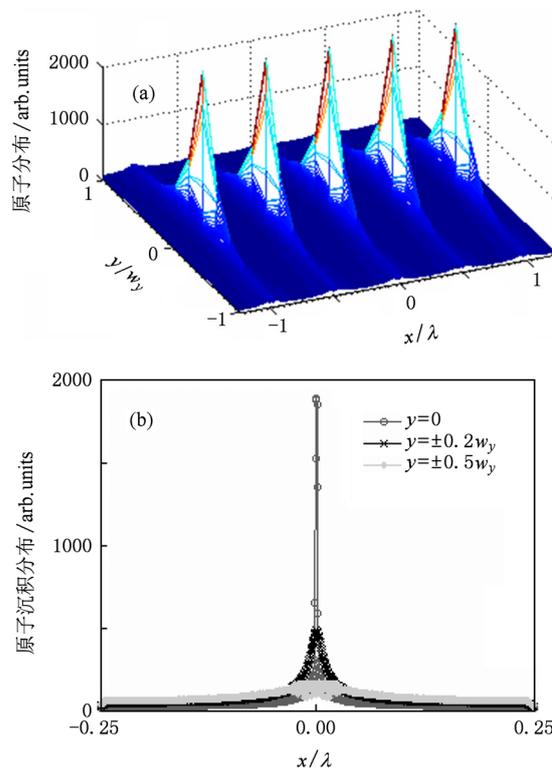


图 2 (a) $\theta = 15^\circ$ 条件下原子沉积条纹的三维结构; (b) $\theta = 15^\circ$ 条件下不同 y 平面沉积条纹对比

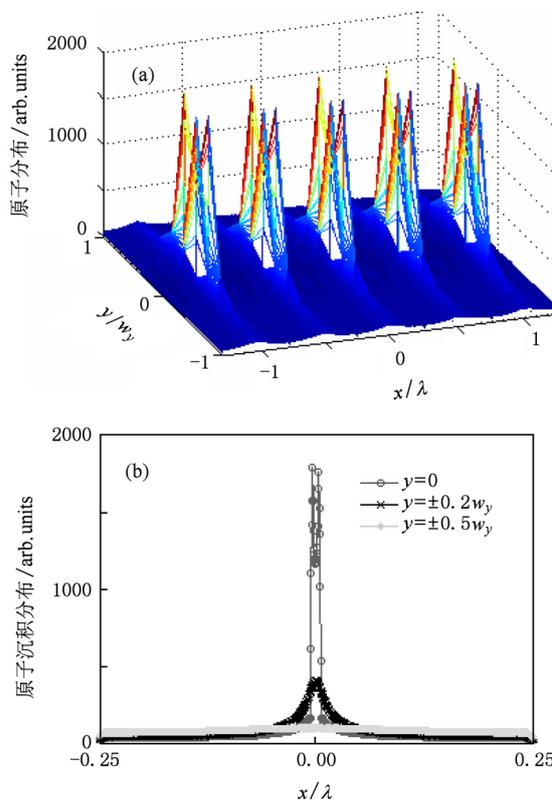


图 3 (a) $\theta = 30^\circ$ 条件下原子沉积条纹的三维结构; (b) $\theta = 30^\circ$ 条件下不同 y 平面沉积条纹对比

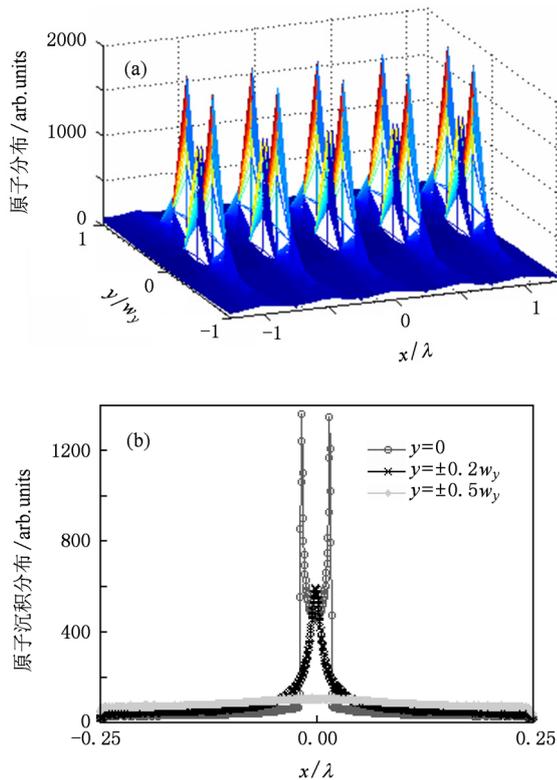


图4 (a) $\theta = 45^\circ$ 条件下原子沉积条纹的三维结构; (b) $\theta = 45^\circ$ 条件下不同 y 平面沉积条纹对比

条纹的半高宽为 1.5 nm, 条纹对比度为 24, 而当椭圆激光驻波场偏斜角度达到 30° 时, 沉积条纹的单峰结构将会产生分裂, 形成了双峰结构, 而在纵向

向上条纹也形成了多峰结构, 这对应着激光驻波场对铬原子的多次汇聚过程, 当偏斜角继续增大至 45° 时, 条纹的分裂现象更加剧烈, 且条纹的高度也会随之降低. 同时纵向条纹的分裂也继续加剧, 造成了沉积条纹质量的进一步恶化. 根据图 1 所示, 结合(4)式可知, 当激光驻波场发生椭圆化和偏斜之后, 原有的激光驻波场的高斯分布将会发生变化, 中性原子在穿越激光驻波场时所感受到的偶极力在原子传输方向上将不再对称, 从而使得不同位置处的中性原子感受到不同偶极力的作用, 继而改变了中性原子的运动轨迹, 造成了沉积条纹的分裂, 且随着偏斜角度的增大, 该种不对称形式越强烈, 所造成的条纹分裂越严重.

4. 结 论

本文详细分析了椭圆激光驻波场的偏斜对中性原子沉积特性的影响, 利用四阶龙格算法实现了椭圆长短轴之比为 2:1 条件下不同偏斜角度条件下中性原子经由激光驻波场的作用后所形成的纳米光栅的特性, 给出了纳米光栅的特性仿真, 得出了当偏斜角超过 30° 时, 纳米光栅在沉积过程中将会出现多峰结构, 使得纳米光栅质量恶化. 对于其他长短轴比例条件下的激光场亦可根据比例关系获得相应的纳米光栅沉积特性.

[1] Drodofsky U, Stuhler J, Brezger B, Schulze Th, Drewsen M, Pfau T, Mlynek J 1997 *Microelectronic Engineering* **35** 285

[2] Chen Y P, Chen X N, Li Z, Chen X Z 2003 *Micronanoelectronic Technology* **7** 546 (in Chinese) [陈元培、陈旭南、李展、陈献忠 2003 微纳电子技术 **7** 546]

[3] Mutzel M, Rasbach U, Meschede D, Burstedde C, Braun J, Kunoth A, Peithmann K, Buse K 2003 *Appl. Phys. B* **77** 1

[4] Zhang W T, Li T B 2007 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **24** 85 (in Chinese) [张文涛、李同保 2007 量子电子学报 **24** 85]

[5] Zeng Z D, Shen H Y 1990 *Optronics Lasers* **1** 168 (in Chinese) [曾振东、沈鸿元 1990 光电子激光 **1** 168]

[6] Zhen C L, Li T B, Ma Y, Ma S S, Zhang B W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4528 (in Chinese) [郑春兰、李同保、马艳、马姗姗、张宝武 2006 物理学报 **55** 4528]

[7] Zhao M, Wang Z S, Ma B, Li F S 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 381 (in Chinese) [赵敏、王占山、马彬、李佛生 2008 光学学报 **28** 381]

[8] Myszkiewicz G, Hohlfeld J, Toonen A J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3842

Chromium atom deposition in elliptical standing wave filed^{*}

Zhang Wen-Tao^{1)†} Zhu Bao-Hua¹⁾ Huang Jing²⁾ Xiong Xian-Ming¹⁾

1) (Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

2) (Guizhou University for Nationalities, Guiyang 550000, China)

(Received 29 September 2010; revised manuscript received 10 December 2010)

Abstract

Direct-write atom lithography is a new technique in which resonant light is used to pattern an atomic beam and the nanostructures are formed when the atoms deposit on a substrate. The motorial characteristics of chromium atoms in an elliptical standing wave filed are discussed, and the simulation results are given with different deflective angles of elliptical standing wave. The full width at half maximum (FWHM) is 3.2 nm and the contrast is 36:1 with a deflective angle of 0°. The FWHM is 6.5nm and the contrast is 24:1 with a deflective angel of 15°, but when the deflective angle reaches 30°, the stripe splits and two-peak configuration is formed.

Keywords: atom lithography, deflective elliptical laser standing wave, nanometer grating

PACC: 32. 80. Pj; 42. 50. Vk

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

[†] E-mail: uestczt@126.com