

基片位置对激光会聚铬原子沉积的影响

张宝武¹ 张文涛² 王道档¹ 余桂英¹

(¹中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018
²广西自动检测技术与仪器重点实验室(桂林电子科技大学), 广西 桂林 541004)

摘要 为了研究基片位置对激光会聚铬原子沉积的影响,基于原子的粒子运动,采用数值计算对基片切割会聚激光场不同部位时高斯激光驻波场光学势阱、原子运动轨迹和沉积条纹进行了仿真。研究结果充分显示了基片位置对上述三方面的影响。虽然基片会对激光产生衍射,但是无论衍射存在与否,沉积条纹半峰全宽的最小值和中心峰值的最大值都出现在基片表面和激光中轴线重合的位置。此时,衍射将使条纹中心峰值降为非衍射时的 0.96 倍,同时,半峰全宽增加至非衍射时的 1.03 倍。另外,仿真结果显示,不管是否考虑衍射,垂直于激光中轴线方向(y 方向)上沉积条纹的中心峰值随 y 值的增加呈现单调减小的趋势,而条纹半峰全宽随 y 值的增加呈现单调递增的趋势。

关键词 衍射; 激光会聚; 光学势阱; 铬原子

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0805002

Effects of Substrate Position on Laser-Focused Cr Atom Deposition

Zhang Baowu¹ Zhang Wentao² Wang Daodang¹ Yu Guiying¹

(¹College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)
(²Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments
(Guilin University of Electronic Technology), Guilin, Guangxi, 541004, China)

Abstract In order to study the effect of substrate position on laser-focused Cr atom deposition, the simulations of optical potential of Gaussian laser standing wave, atomic trajectories and deposited lines are performed based on the perspective of atomic trajectory with different substrate positions in the focusing laser. Effects on the above three aspects are fully indicated by substrate position. In spite of diffraction by substrate, the optimal substrate position occurs when substrate surface coincides with the laser axis. At the optimal position, with diffractive laser, deposited lines have full width at half maximum (FWHM) 0.96 times and the center peak value 1.03 times of that deposited by non-diffractive laser. Further more, in spite of diffraction by substrate, the deposited lines along y direction perpendicular to the laser axis have monotone decreasing center peak values and monotone increasing FWHM with different values of y .

Key words diffraction; laser focusing; optical potential; Cr atom

OCIS codes 050.1960; 020.1335; 020.7010

1 引 言

激光会聚铬原子沉积技术在研制便于制作、包装和运输且可用于现场或一般实验室校准的纳米溯源传递标准方面具有明显优势和广阔前景,它为纳米测量仪器长度精确测量问题的解决提供了一条崭新的思路^[1-2]。为了探讨激光会聚铬原子沉积过程的本质,国内外相关小组除了进行实验研究之外,也

进行了比较深入的理论仿真研究,至今已经获得了丰硕的理论成果^[3-8]。这些研究成果一定程度上反映了各种因素对原子沉积条纹精细化的影响,但是这些理论研究存在一个共同的不足之处,那就是没有考虑基片边缘对会聚激光的衍射作用。实际上,会聚激光场的结构在激光会聚原子沉积技术中具有关键性的作用,它的任何变化都会对沉积条纹产生

收稿日期: 2014-02-10; **收到修改稿日期**: 2014-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(11064002)、浙江省自然科学基金(LQ13F050002)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ14206)、广西自然科学基金(2012GXNSFAA53229,2013GXNSFDA019002)

作者简介: 张宝武(1978-),男,博士,副教授,主要从事激光技术应用方面的研究。E-mail: zhangbaowu1978@gmail.com

明显的影响。为此,文献[9-11]从直边衍射物理模型入手,对比讨论了基片衍射存在与否两种情况下高斯激光驻波场和光学势阱特性,以及衍射光场对原子沉积的影响。本文在此基础上,研究了基片位置对沉积条纹的影响,并和非衍射时的结果进行比较。

2 理论分析

仿真所依据的实验装置和理论原理在文献[10]中已有详细的描述,此处直接引用其中一些关键的内容。

图1给出了实验中会聚激光束、基片和反射镜之间的相互位置关系。其中准直原子束沿着 z 轴自上而下传播,会聚激光束沿着 x 轴自左向右传播, b_0 表示激光中轴线和基片沉积表面之间的距离,而激光束腰严格位于反射镜上。

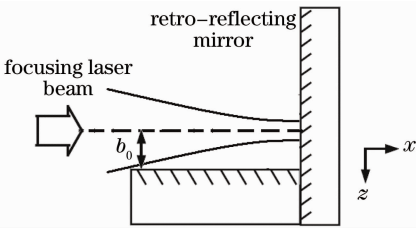


图1 会聚激光束,基片和反射镜之间的位置关系
Fig.1 Position relation of focusing laser beam, substrate and retro-reflecting mirror

因为基片会切割不同的激光束部位,所以由基尔霍夫近似标量衍射理论可知,在基片边缘和反射镜之间 x_1 处的光场将由衍射复振幅给出^[12],即

$$\tilde{E}_1 = \frac{\exp(ikx_1)}{i\lambda x_1} \int_{\Sigma} \tilde{E}_1(y_1, z_1) \times \exp\left\{\frac{ik}{2x_1}[(z-z_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} dz_1 dy_1, \quad (1)$$

式中 i 是虚数单位; $k=2\pi/\lambda$ 是激光波数,其中, λ 是激光波长;积分区域 Σ : $y_1 \in [-\infty, \infty]$; $z_1 \in [-\infty, 0]$ 。 $\tilde{E}_1(y_1, z_1)$ 为入射高斯激光在 Σ 中任一点的复振幅。

(1)式所示的衍射行波场与其反射波 \tilde{E}_2 相遇叠加后就会形成驻波场,其光强表达式为

$$I = (\tilde{E}_1 + \tilde{E}_2)(\tilde{E}_1 + \tilde{E}_2)^*, \quad (2)$$

将(2)式代入到会聚原子的光势阱表达式^[3]中,就可以获得光学势阱表达式

$$U = \frac{\hbar\Delta}{2} \ln\left(1 + \frac{I}{I_s} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4\Delta^2}\right), \quad (3)$$

式中 \hbar 为除以 2π 的普朗克常数, Δ 为激光频率失谐

量, Γ 是原子跃迁的自然线宽, I_s 为原子跃迁的饱和强度。

光学势阱中原子运动轨迹方程为

$$x'' = \frac{1+x'^2}{2(E_0-U)} \left(x' \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial U}{\partial x}\right), \quad (4)$$

式中 $x' = \frac{\partial x}{\partial z}$; $x'' = \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}$; $E_0 = \frac{mv^2}{2}$,其中, m 为原子质量, v 为原子纵向速度。由此即可仿真衍射时光学势阱中原子运动轨迹和沉积条纹。

3 仿真结果和讨论

基于前面的理论分析,在数值仿真过程中与⁵²Cr原子相关的参数设置如下:对应于共振跃迁⁷S_{3/2}→⁷P_{3/2}的激光波长 $\lambda=425.55$ nm,跃迁谱线的自然线宽 $\Gamma=2\pi \cdot 5$ MHz,饱和光强 $I_s=85$ W/m²,激光失谐量 $\Delta=2\pi \cdot 250$ MHz。另外,激光束腰 $\omega_0=0.1$ mm,入射激光功率 $P_0=3.93$ mW。基片沉积表面固定于 $z=0$ 的平面处,仿真周期为反射镜之前 $[-0.75\lambda, -0.25\lambda]$ 。

首先仿真了衍射情况下参量 b_0 不同时光学势阱中原子的运动轨迹,如图2所示,其中同时给出了光学势阱沿 z 轴的变化。图2(a1)和(a2)为 $b_0=-\omega_0$,图2(b1)和(b2)为 $b_0=-0.5\omega_0$,图2(c1)和(c2)为 $b_0=0$,图2(d1)和(d2)为 $b_0=\omega_0$,它们分别对应于图3中(a)、(b)、(c)和(d)的4种激光和基片相互位置关系。为了清晰显示,每张图只给出9条原子轨迹,每个原子的纵向入射速度都为960 m/s,横向入射速度都为0。为了对比,在图中用短画线给出了相同情况下非衍射时原子的运动轨迹和光学势阱变化曲线。

图2显示,不管参量 b_0 的数值如何,也不管衍射存在与否,原子束都会在激光中轴处会聚。不过其中也清晰的显示出,衍射存在与否对应的原子运动轨迹是不同的:当 $b_0=-\omega_0$ 时,激光掠射基片表面,此时激光场的尾部会被基片阻挡而会使会聚势阱存在轻微的衍射[见图2(a2)]。虽然这种衍射势阱存在一定的强度振荡,但是由于其轮廓线仍然遵循非衍射时的高斯曲线,衍射峰值和原激光中轴线基本重合,所以,此时两种条件下的原子运动轨迹没有明显区别。当 $b_0=-0.5\omega_0$ 时,入射激光的四分之一轮廓被基片阻挡而会使会聚势阱产生较严重的衍射[见图2(b2)],衍射势阱在原激光中轴线所处位置($z=-0.5\omega_0$)前后各产生了一个衍射峰值A和B。其中峰值A是原激光中轴线峰值的1.01倍,且沿 z

轴前移了 $0.25\omega_0$, 峰值 B 是原激光中轴线峰值的 1.16 倍, 且沿 z 轴后移了 $0.1\omega_0$ 。因此, 相对非衍射光场, 衍射光场将略早地会聚原子 [见图 2(b1)]。由于基片表面和原子汇聚点之间距离较大, 所以, 会聚后的原子会落在离光学势阱中心处 ($x = -0.5\lambda$) 较远的地方。当 $b_0 = 0$ 时, 激光有一半被基片阻挡, 此时会聚光场存在严重的衍射 [见图 2(c1)]。此时, 衍射势阱产生的峰值是原激光中轴线峰值的 1.05 倍, 且沿 z 轴前移了 $0.37\omega_0$ 。由此造成的结果是衍射时原子将相对非衍射时较早地被会聚, 且效

果较为明显 [见图 2(c1)]。由于基片表面和原子汇聚点之间距离较小, 所以, 会聚后的原子相对非衍射时落在离光学势阱中心处 ($x = -0.5\lambda$) 较远的地方。当 $b_0 = 0.5\omega_0$ 时, 激光只有很小的尾部在基片沉积表面之前, 此时会聚光场中也存在衍射效应, 同样会产生一个前移的衍射峰值 [见图 2(d2)]。虽然会聚光场本身非常微弱, 但是由于前移衍射峰值的存在使原子运动轨迹较早地被会聚, 且在基片上的落点相对非衍射时离光学势阱中心处 ($x = -0.5\lambda$) 较近 [见图 2(d1)]。

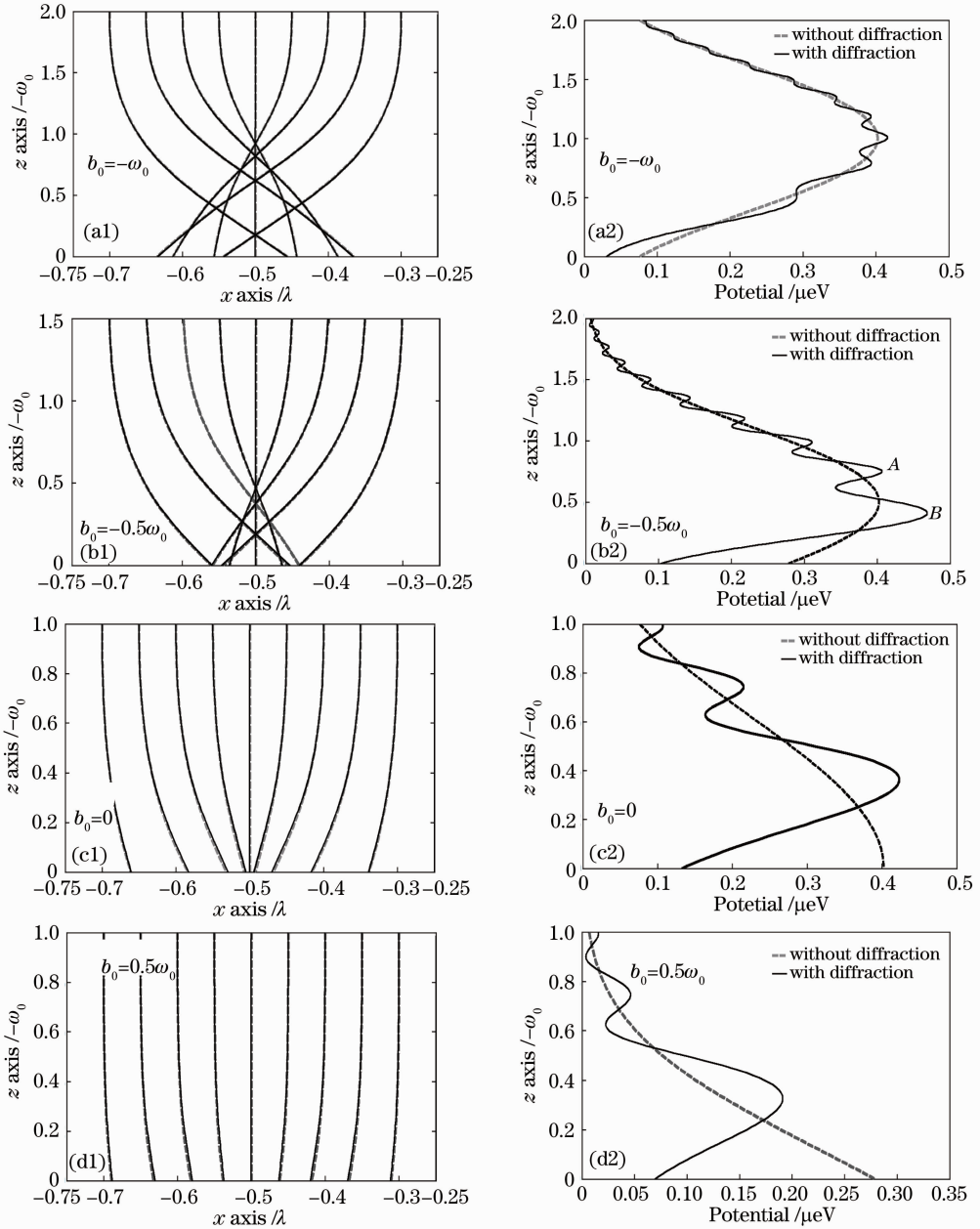


图 2 参量 b_0 不同时 (a1), (b1), (c1), (d1) 原子运动轨迹和 (a2), (b2), (c2), (d2) 光学势阱沿 z 轴的变化

Fig. 2 (a1), (b1), (c1), (d1) atomic trajectories and (a2), (b2), (c2), (d2) variation of optical potential along z axis with different parameters of b_0

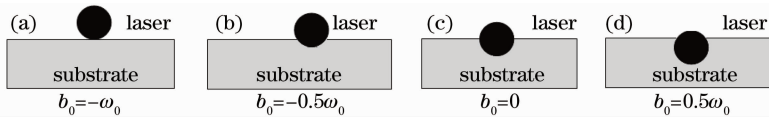


图 3 基片与会聚激光之间的位置关系

Fig. 3 Positions of substrate and focusing laser beam

在图 2 仿真原子轨迹基础上,利用柱状图将每个原子在基片沉积表面上的落点累加起来即可得到原子沉积条纹,如图 4 所示。仿真过程采用文献[4]描述的蒙特卡罗方法处理原子的初始运动状态。为了对比,每一张图同时给出相同情况下非衍射时原子沉积条纹。

图 4(a)显示当 $b_0 = -\omega_0$ 时,沉积条纹呈现中间凹两边翘的结构,且衍射存在与否两种情况下的结构一样。这正好反映了图 2(a1)的原子运动轨迹:虽然高斯激光的尾部因基片作用而产生了一定的衍射,但是光学势阱变化不大;原子被激光会聚后,继续运动一段时间才到达基片,原子束在基片上的落点略微弥散开来。图 4(b)显示当 $b_0 = -0.5\omega_0$ 时,衍射光场形成的条纹在结构上与非衍射时非常相似,但是中心峰值是非衍射时峰值的 0.82 倍,半峰全宽(FWHM)是非衍射时半峰全宽的 1.54 倍。这与图 2(b1)的原子运动轨迹相对应:由于基片表面和原子汇聚点之间距离较大,会聚后的原子会相对

非衍射时落在离光学势阱中心处($x = -0.5\lambda$)较远的地方,从而使条纹中心峰值略低。图 4(c)显示当 $b_0 = 0$ 时,衍射光场形成的条纹与非衍射时的同样在结构上非常相似,中心峰值是非衍射时峰值的 0.96 倍,半峰全宽是非衍射时的 1.03 倍。这是由图 2(c2)的衍射势阱所造成的:由于基片表面和原子汇聚点之间距离较小,前移和提高的衍射峰值使会聚后的原子相对非衍射时落在离光学势阱中心处($x = -0.5\lambda$)较近的地方。图 4(d)显示,当 $b_0 = 0.5\omega_0$ 时,衍射光场形成的条纹与非衍射时同样在结构上非常相似,中心峰值略微大于非衍射时的峰值,但是整个条纹已经不是那么突出,显得比较平坦,这主要是因为在这种情况下,衍射存在与否两种情况下的会聚势阱都比较小,会聚力较小;但是衍射势阱存在一个前移的峰值,所以形成的条纹中心峰值略微大一些。

为了找出基片位置对沉积条纹影响的量化关系,详细研究了原子沉积条纹半峰全宽和中心峰值随参量 b_0 的变化,分别如图 5(a)和(b)所示。

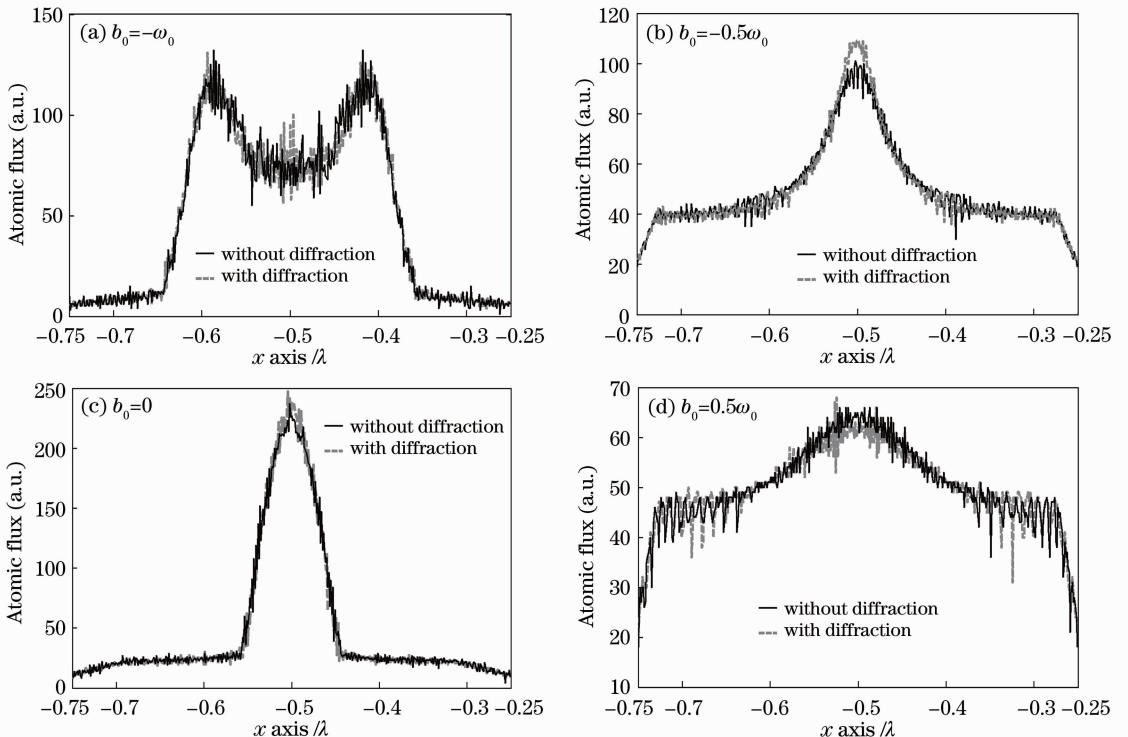


图 4 参量 b_0 不同时原子沉积条纹

Fig. 4 Atomic deposition lines with different parameters of b_0

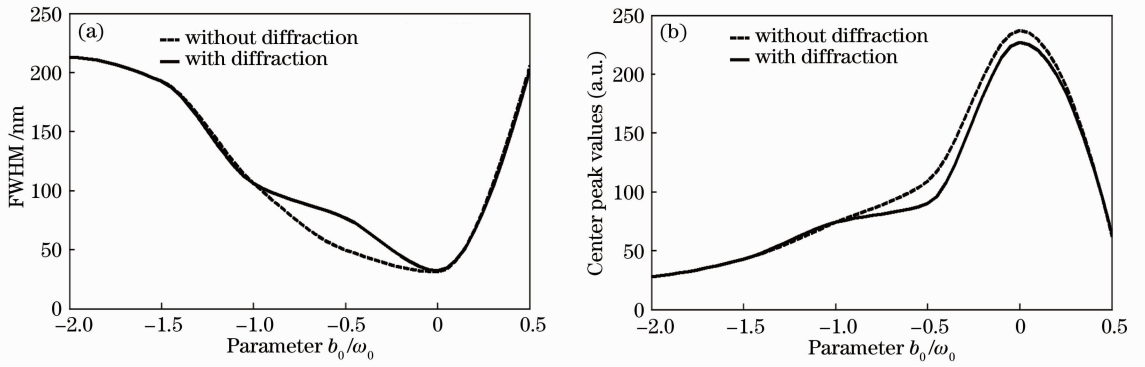


图 5 原子沉积条纹(a)半峰全宽和(b)中心峰值随参量 b_0 的变化

Fig. 5 (a) FWHM and (b) center peak values of atomic deposition lines versus parameters of b_0

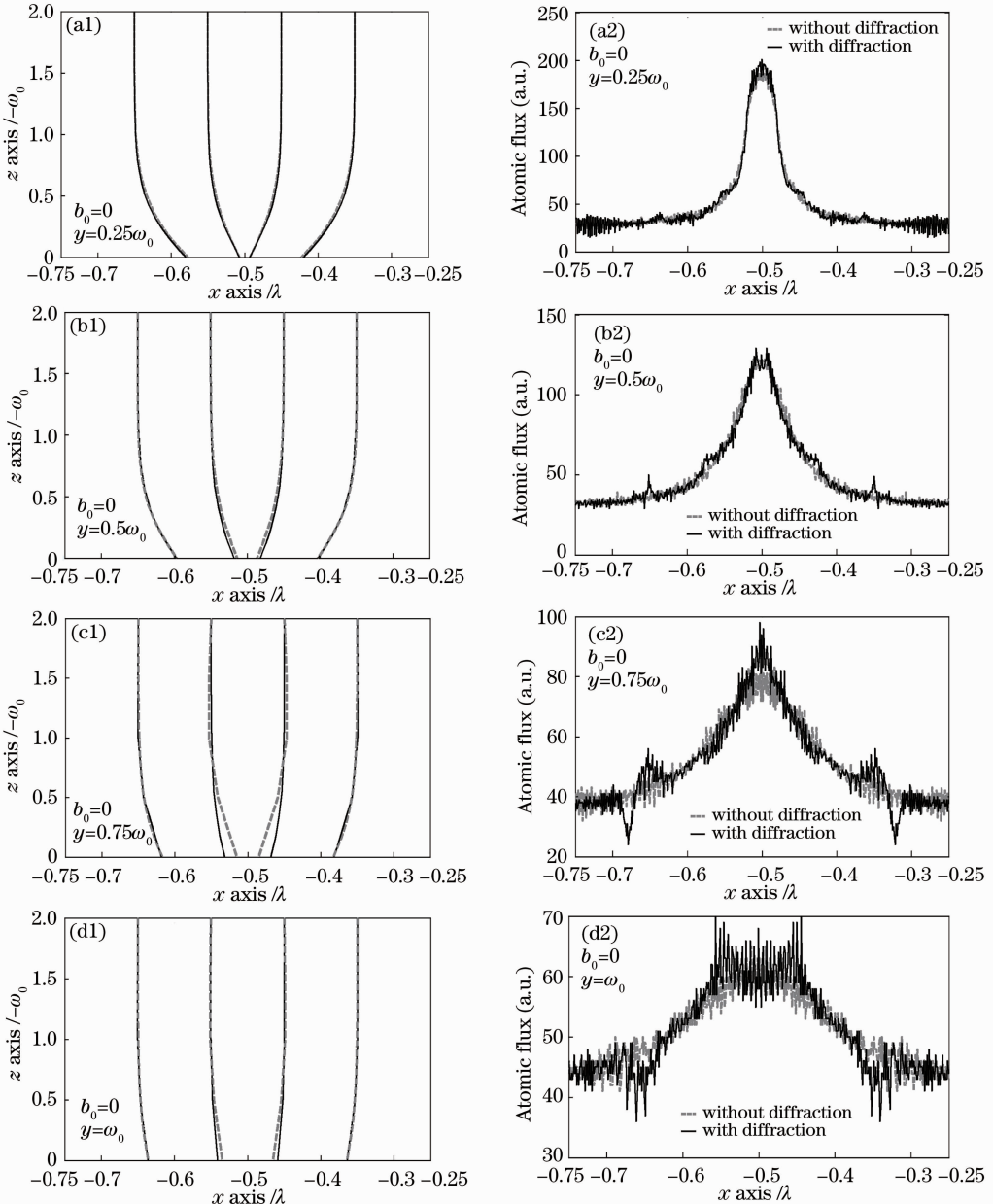


图 6 不同 y 值截面内(a1),(b1),(c1),(d1)原子运动轨迹和(a2),(b2),(c2),(d2)沉积条纹

Fig. 6 (a1),(b1),(c1),(d1) atomic trajectories and (a2),(b2),(c2),(d2) deposition lines in cross section for different values of y

图 5(a)显示,原子沉积条纹的半峰全宽随参数 b_0 的变化呈现先减小、后增大的趋势,其中最小值处于 $b_0=0$ 位置处。图 5(b)显示,原子沉积条纹的中心峰值随参数 b_0 的变化呈现先增加、后减小的趋势,其中最大值处于 $b_0=0$ 位置处。总的来说,在 $b_0 \in [-\omega_0, 0.5\omega_0]$ 区间内,即激光束始终与基片相互作用时,会聚势阱存在衍射,此时原子沉积条纹半峰全宽和中心峰值在随参数 b_0 的变化过程中,衍射时条纹的半峰全宽略大于非衍射时的半峰全宽,衍射时的中心峰值略小于非衍射时的中心峰值。

除了上述 $y=0$ 这个截面内原子运动和沉积条纹的仿真以外,还考察了基片表面上不同 y 值截面内原子运动轨迹和沉积条纹受基片衍射的影响情况,如图 6 所示,(a1)、(b1)、(c1)和(d1)分别为不同 y 值截面内原子的运动轨迹;为了对比,在图中用短

划线给出了相同情况下非衍射时原子的运动轨迹和光学势阱变化曲线。图 6(a2)、(b2)、(c2)和(d2)分别为不同 y 值截面内原子的沉积条纹。

从图 6 中可以看出,随着 y 值的增大,原子运动轨迹逐渐远离 $x=-0.5\lambda$ 位置处,并且慢慢趋向于直线。这主要是由于随着 y 的增大,激光能量随高斯轮廓减小的速度非常快,直至消失,进而激光对原子的偶极力随 y 值的增大也将迅速减小。

图 7(a)显示,原子沉积条纹的中心峰值随 y 值的增加呈现单调减小的趋势。而图 7(b)中的条纹半峰全宽却随 y 值的增加呈现单调递增的趋势。这种变化和图 6 中的原因一致,即随着 y 的增大,激光能量随高斯轮廓减小的速度非常快,直至消失,进而激光对原子的偶极力随 y 值的增大也将迅速减小。

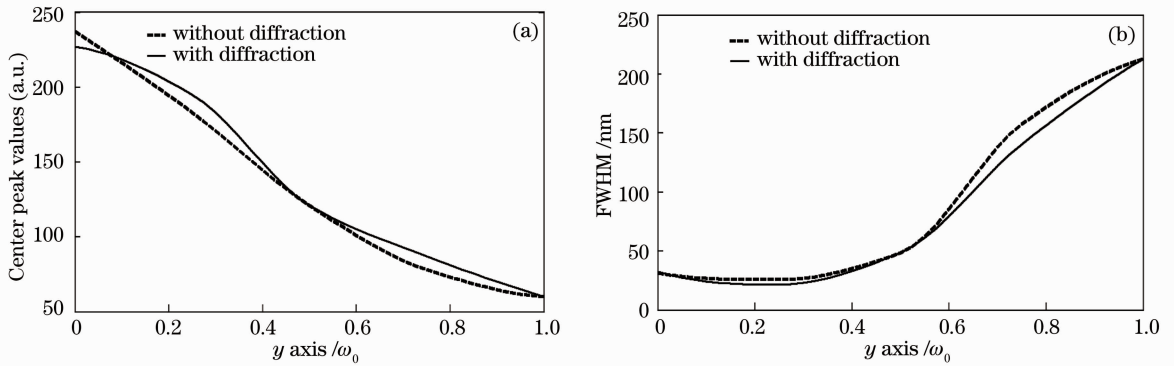


图 7 原子沉积条纹(a)中心峰值和(b)半峰全宽随 y 值的变化

Fig. 7 (a) Center peak values and (b) FWHM of atomic deposition lines versus y

4 结 论

以原子的粒子运动为出发点,通过仿真研究了基片位置对激光会聚铬原子沉积的影响。仿真结果清晰地显示出基片位置对会聚势阱的衍射效应,进而影响原子的运动轨迹,最终的沉积条纹将会发生一定的改变。不管衍射存在与否,沉积条纹半峰全宽的最小值和中心峰值的最大值都出现在基片表面和激光中轴线重合的位置。另外,还仿真研究了基片表面垂直激光轴线方向上不同 y 值截面内原子运动轨迹、沉积条纹,以及条纹半峰全宽和中心峰值的情况。研究结果为实验沉积条纹的分析提供了理论指导。

参 考 文 献

- Li Tongbao. Nanometrology and transfer standard[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2005, 1(185): 8-13.
- 李同保. 纳米计量与传递标准[J]. 上海计量测试, 2005, 1

(185): 8-13.

- McClelland J J, Anderson W R, Bradley C C, *et al.*. Accuracy of nanoscale pith standards fabricated by laser-focused atomic deposition[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2003, 108(2): 99-113.
- Zhang Wentao, Zhu Baohua, Huang Jing, *et al.*. Chromium atom deposition in elliptical standing wave field[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10): 103203.
张文涛, 朱保华, 黄静, 等. 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[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 103203.
- Zhang Pingping, Ma Yan, Li Tongbao. Optimization of particle optics model for one-dimensional atom lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0514004.
张萍萍, 马艳, 李同保. 一维原子光刻经典模型的优化[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0514004.
- Zhang Pingping, Ma Yan, Zhang Baowu, *et al.*. Properties of 3D nanostructures fabricated by laser-focused Cr atomic deposition [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1114001.
张萍萍, 马艳, 张宝武, 等. 激光会聚铬原子光栅三维特性分析[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1114001.
- Ma Yan, Li Tongbao, Wu Wen, *et al.*. Laser-focused atomic deposition for nanoscale grating [J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(7): 073202.

- 7 Deng Xiao, Ma Yan, Zhang Pingping, *et al.*. Investigation of shadow effect in laser-focused atomic deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 261(15): 464–469.
- 8 Chen Sheng, Ma Yan, Zhang Pingping, *et al.*. Analysis of Cr atom focusing deposition properties in the double half Gaussian standing wave field[J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(2): 020301.
- 9 Zhang Baowu, Zhi Lixiang, Zhang Wentao. Simulations of optical potential of Gaussian laser standing wave by diffraction of straight edge[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 183201.
张宝武, 支理想, 张文涛. 基于直边衍射高斯激光驻波光学势阱仿真[J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 183201.
- 10 Zhang Baowu, Ma Yan, Zhang Pingping, *et al.*. Effects of substrate diffraction on evolution of the atom wave-packet probability density in the focusing laser standing wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1205003.
张宝武, 马艳, 张萍萍, 等. 基片衍射对汇聚激光驻波场中原子波包几率密度演化的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1205003.
- 11 Zhang Baowu, Zhi Lixiang, Zhang Wentao, *et al.*. Effect of atomic velocity at substrate diffraction on laser-focused Cr atom deposition[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 421–424.
张宝武, 支理想, 张文涛, 等. 基片衍射时原子速率对激光汇聚铬原子沉积的影响[J]. *激光技术*, 2013, 37(4): 421–424.
- 12 Yu Daoyin. Tan Hengying, *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2012. 382–383.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012. 382–383.

栏目编辑: 韩峰