

# 基片衍射对会聚激光驻波场中原子波包 几率密度演化的影响

张宝武<sup>1</sup> 马 艳<sup>2</sup> 张萍萍<sup>2</sup> 李同保<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018  
<sup>2</sup> 同济大学上海市特殊人工微结构材料与技术重点实验室, 上海 200092)

**摘要** 针对激光会聚铬原子沉积实验, 运用标量衍射理论, 通过数值模拟研究了基片衍射对会聚激光驻波场中原子波包几率密度演化的影响。结果显示基片衍射的影响会随激光中轴线与基片沉积表面距离  $b_0$  的变化而变化。相对于非衍射情况, 衍射效应会提高激光驻波场中会聚平面内原子波包几率密度分布的中心值, 同时减小其半峰全宽。当参量  $b_0 = -0.2w_0$  ( $w_0$  为高斯光束的束腰半径) 时, 原子波包几率密度的会聚平面和基片沉积表面完全重合。此处, 衍射时原子波包几率密度分布的中心值为 1.26, 其半峰全宽为 5.62 nm, 两者分别为非衍射时的 1.1 倍和 0.94 倍。

**关键词** 激光技术; 激光会聚; 标量光衍射; 原子波包

**中图分类号** O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1205003

## Effects of Substrate Diffraction on Evolution of the Atom Wave-Packet Probability Density in the Focused Laser Standing Wave

Zhang Baowu<sup>1</sup> Ma Yan<sup>2</sup> Zhang Pingping<sup>2</sup> Li Tongbao<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China  
<sup>2</sup> Shanghai Key Laboratories of Special Artificial Microstructure Materials and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Based on laser focused Cr atom beam deposition, the simulations of effect of substrate diffraction on evolution of the atom wave-packet probability density in the focused laser standing wave are done with scalar optical diffraction theory. The results show that such effect will vary with parameter  $b_0$  which stands for the distance between laser axis and substrate surface which is used for deposition. Compared with non-diffraction, the central value of the probability density distribution of the atom wave packet at the focal plane will be increased and its FWHM will be reduced by substrate diffraction. When  $b_0 = -0.2w_0$ , the focal plane of the atom wave packet coincides with substrate surface, and the probability density distribution of the atom wave packet has central value of 1.26 with FWHM of 5.62 nm under diffraction, which are 1.1 times and 0.94 times of that without diffraction, respectively.

**Key words** laser technology; laser focusing; scalar optical diffraction; atomic wave packet

**OCIS codes** 020.1335; 020.7010; 050.1960

## 1 引 言

20 世纪 60 年代以来, 随着激光技术的突飞猛进, 原子的激光操控技术也逐步变成现实, 例如能够减小原子速度进而降低其动能的激光冷却技术<sup>[1,2]</sup>

以及能够稳定捕获原子、导引原子的冷原子技术<sup>[3]</sup>等。原子惯性技术<sup>[4]</sup>(原子陀螺、原子加速度计、原子重力仪)和原子钟<sup>[5]</sup>等仪器的研制、开发和应用表明原子光学无论在理论探讨还是实验手段上都已经

**收稿日期**: 2012-06-11; **收到修改稿日期**: 2012-08-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(10972210)、浙江省钱江人才计划(2011R10094)、浙江省自然科学基金(LQ12E05018)和上海市特殊人工微结构材料与技术重点实验室开放基金(ammt2011A-3)资助课题。

**作者简介**: 张宝武(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事原子光刻技术方面的研究。E-mail: zhangbaowu1978@gmail.com

进入成熟阶段。基于此,原子光学在微米制造领域内的应用,尤其是激光会聚中性原子沉积技术逐步走进人们的视野<sup>[6~11]</sup>。利用这种技术获得的一维纳米光栅结构在校准原子力显微镜等纳米测量仪器方面呈现出诱人的应用前景<sup>[12,13]</sup>。

为了获得对比度好、能够准确反映激光驻波场光学势阱周期的纳米光栅,实验中一般要求入射的会聚激光束的中轴线和基片沉积表面严格平行,以掠射的形式沿着这个基片表面传播。当光束遇到反射镜后会原路返回,和其自身叠加,形成会聚原子的光波场。由于基片在垂直光轴方向上的厚度约为 2 mm,而准直激光束的截面直径不超过 0.1 mm,因此,基片会将会聚激光束挡掉一半。考虑到基片厚度和激光束截面直径尺寸上的悬殊差别,它们两者之间构成了直边衍射的物理情形。这样,基片沉积表面上传播的驻波场就会受到衍射效应的影响,原子在通过这样的会聚驻波场时就会呈现出不同于非衍射情况下运动状态,进而纳米光栅的沉积精度也会受到影响。因此,研究激光驻波场中基片衍射效应的影响对激光会聚中性原子沉积技术来说具有非常重要的意义。

本文以激光会聚铬原子束沉积为例,运用标量衍射理论,从原子波动性出发,通过数值计算对比研究了基片衍射与否两种情况下铬原子波包通过会聚激光驻波场时几率密度演化情况,其中主要研究了激光

中轴线与基片沉积表面距离  $b_0$  这个参数的影响。

## 2 理论分析

图 1 给出了激光会聚铬原子沉积实验中会聚激光束,基片和全反镜之间的相互位置关系,其中准直原子束沿着  $z$  轴正方向传播,会聚激光束沿着  $x$  轴正方向传播,参量  $b_0$  表示激光中轴线和基片沉积表面之间的距离。

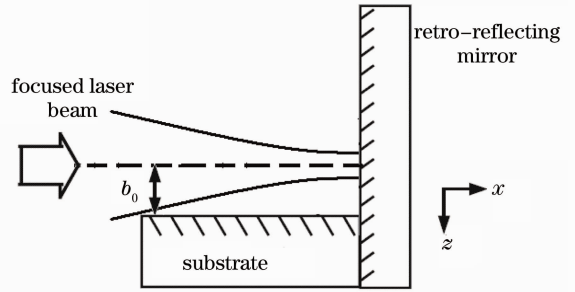


图 1 会聚激光束、基片和全反镜之间的位置关系  
Fig. 1 Positions of focused laser beam, substrate and retro-reflecting mirror

从图 1 抽象出来的高斯光束直边衍射原理如图 2 所示,其中基片沉积表面位于  $y_1Cx$  内。 $K$  平面代表图 1 中基片左侧垂直于  $x$  轴的边缘,即直边衍射屏(坐标为  $y_1Cz_1$ ,  $z_1 < 0$  的白色区域为透光孔  $\Sigma$ ), $F$  平面代表全反镜的反射面, $E$  代表全反镜之前,基片沉积表面区域内某一个考察屏(坐标为  $yP_0z$ )。 $K$ 、 $F$  和  $E$  三个平面相互平行且垂直于  $x$  轴。

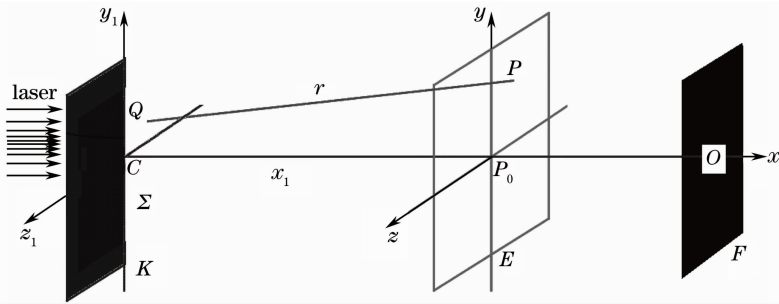


图 2 高斯光束直边衍射原理

Fig. 2 Principle of Gaussian beam diffraction by straight edge

由菲涅耳标量衍射理论可知,入射激光在传播距离为  $x_1$  的考察屏上的  $P$  点复振幅为<sup>[14]</sup>

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

式中  $i$  为虚数单位,  $k = 2\pi/\lambda$  为入射激光波数,  $\lambda$  为波长;积分区域覆盖透光孔  $\Sigma: y_1 \in [-\infty, \infty]$ ;  $z_1 \in [-\infty, 0]$ ;  $\tilde{E}_Q(y_1, z_1)$  为积分区域内任意一点

$Q$  的复振幅。整个系统的  $x$  轴原点设置在全反镜的中心  $O$  点处,则  $Q$  点的坐标可记为  $(x_0, y_1, z_1)$ ,  $Q$  点相对于反射镜的镜像  $Q'$  坐标可以记为  $(-x_0, y_1,$

$z_1$ )。设考察屏上  $P$  点的坐标为  $(x, y, z)$ , 则它和  $Q$  点的垂直距离为  $x_1 = x - x_0$ ,  $P$  点和  $Q'$  点的垂直距离为  $x_2 = x + x_0$ 。

对于入射高斯激光来说, 它在透光区  $\Sigma$  中的某一点  $Q$  的复振幅表示为

$$\tilde{E}_Q(y_1, z_1) = \frac{E_0}{\omega(x)} \exp\left[-\frac{(z_1 - b_0)^2 + y_1^2}{w^2(x)}\right] \times \exp\left\{ik\left[x + \frac{(z_1 - b_0)^2 + y_1^2}{2R(x)}\right]\right\}, \quad (2)$$

式中  $E_0$  为激光中轴线上的振幅,  $\omega(x)$  为  $x$  位置处光束的截面半径,  $R(x)$  为  $x$  位置处光束波面曲率半径。

将(2)式代入(1)式, 即可得到入射激光经过基片边缘衍射后沿基片沉积表面传播的行波场。当这个行波场遇到反射镜时, 会被原路反射, 形成反射波。反射波可以看成入射波通过反射镜的镜像加上半波损失产生的, 它在  $P$  点复振幅记为  $\tilde{E}_Q(P)$ 。这样, 入射行波场和反射行波场相遇叠加后就会形成驻波场, 其光强表达式为

$$I = [\tilde{E}_Q(P) + \tilde{E}_Q(P)][\tilde{E}_Q(P) + \tilde{E}_Q(P)]^*. \quad (3)$$

将(3)式代入到会聚原子的光势阱表达式<sup>[13]</sup>中, 就可以得到衍射情况下会聚激光驻波光势阱表达式

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

式中  $\hbar$  为除以  $2\pi$  的普朗克常数,  $\Delta$  为激光频率失谐量,  $\Gamma$  是原子跃迁的自然线宽,  $I_s$  为原子跃迁的饱和强度。

按 de Broglie 关系, 假定沿  $z$  轴方向以平均速率  $v_z$  传输的铬原子束对应的是一个平面波, 原子在某一时刻出现在某一位置附近的几率分布在  $x$  方向上为一个高斯分布的波包<sup>[15]</sup>, 其中心沿  $z$  方向具有一定的初始平均动量, 则在坐标表象内波函数(记入时间相关因子)为

$$\Psi(x, z, p_z, t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_x} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\sigma_x^2}\right) \times \exp(ik_{z_0} z - i\omega t), \quad (5)$$

式中  $\sigma_x$  为  $x$  方向上原子波包的初始宽度,  $k_{z_0}$  为原子波包传播的波矢,  $\omega$  为原子波包传播频率,  $t$  为波包传播时间。

文献<sup>[15]</sup>详细推导了会聚激光驻波场中原子波函数演化过程中满足的定态薛定谔方程, 即

$$\frac{\partial}{\partial z} \Phi(x, z) = \left(a \frac{\partial^2}{\partial x^2} + b \frac{i}{\hbar v_z}\right) \Phi(x, z), \quad (6)$$

式中  $a = \frac{\hbar}{2mv_z}$ ;  $b = \frac{-i}{\hbar v_z} U$ ,  $m$  为原子质量,  $U$  为(4)式表示的光学势阱,  $\Phi(x, z)$  为波函数中与时间无关的部分。

基于以上理论分析和参考文献<sup>[16]</sup>, 设定好参量以后, 即可仿真铬原子波包穿过会聚激光驻波场的演化情况, 最后所得的结果用原子波包相对几率密度  $P = |\Phi(x, z)|^2$  来表示, 即每一个位置处原子波包的几率密度以初始几率密度分布的中心值作为归一化条件, 其中激光波长为 425.55 nm, 束腰半径为 0.1 mm, 功率为 3.93 mW, 频率失谐量为  $2\pi \times 250$  MHz; 原子波包纵向平均速度为 960 m/s, 横向发散角为 0.16 mrad。

### 3 模拟结果

基片衍射情况下会聚激光驻波场的光学势阱如图 3 所示。图 3(a) 为光学势阱一个周期内的三维结构, 图 3(b) 为光学势阱的俯视图, 图 3(c) 为光学势阱在  $x = 0$  截面内沿  $z$  轴的长度分布, 图 3(d) 为光学势阱在  $z = 23$  截面内沿  $x$  轴的长度分布。基片沉积表面位于  $z = 0$  的平面内, 参量  $b_0 = -w_0$ , 其中  $w_0$  为高斯光束的束腰半径。为了对比, 图 4 给出了和图 3 对应的非衍射情况下的光学势阱。

对比图 3 和图 4, 可以清楚的看出, 基片衍射与否两种情况下光学势阱存在如下异同点。在光轴方向上, 衍射与否不会影响光学势阱形成驻波的特性[见图 3(b) 和图 4(b), 图 3(d) 和图 4(d)]; 在垂直光轴方向上, 衍射存在与否也不影响光学势阱高斯分布的轮廓线特征[见图 3(c) 和图 4(c)]。不过, 基片衍射会使光学势阱围绕高斯分布的轮廓线产生强度的振荡[见图 3(c) 和图 4(c)], 并且会略微增大光学势阱的最大值[见图 3(d) 和图 4(d)]。

基片衍射与否两种情况中原子波包经过光学势阱前后的演化情况如图 5 所示, 其中图 5(a), (b) 分别为基片衍射和非基片衍射时原子波包演化过程俯视图, 图 5(c) 为衍射与否两种情况下原子波包几率密度和光学势阱强度在  $x = 50$  这个截面内沿  $z$  方向的变化情况, 图 5(d) 给出了衍射与否两种情况下原子波包几率密度和光学势阱强度在会聚平面内[见图 5(a) 和图 5(b) 中  $z = 22$  这个截面]沿  $x$  方向的变化情况。

图 5 显示, 不管基片衍射与否, 原子波包经过光学势阱作用以后都会出现几率密度会聚的现象, 并且这个会聚平面和光学势阱最大值之间有一定的距

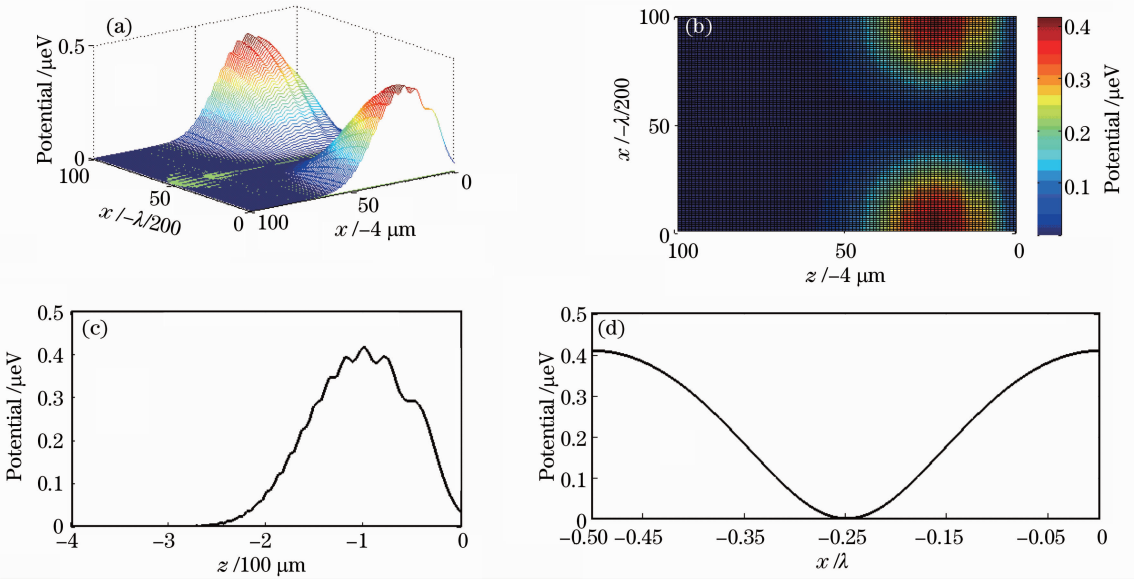


图 3 衍射情况下的会聚激光驻波场光学势阱。(a)光学势阱一个周期内的三维结构;(b)光学势阱的俯视图;(c)光学势阱在  $x=0$  截面内沿  $z$  轴的方向分布;(d)光学势阱在  $z=23$  截面内沿  $x$  轴的方向分布

Fig. 3 Optical potential well of focused laser standing wave field with diffraction. (a) 3D structure of optical potential well within one period; (b) vertical view of optical potential well; (c) intensity distribution of optical potential well along  $z$  direction at  $x=0$ ; (d) intensity distribution of optical potential well along  $x$  direction at  $z=23$

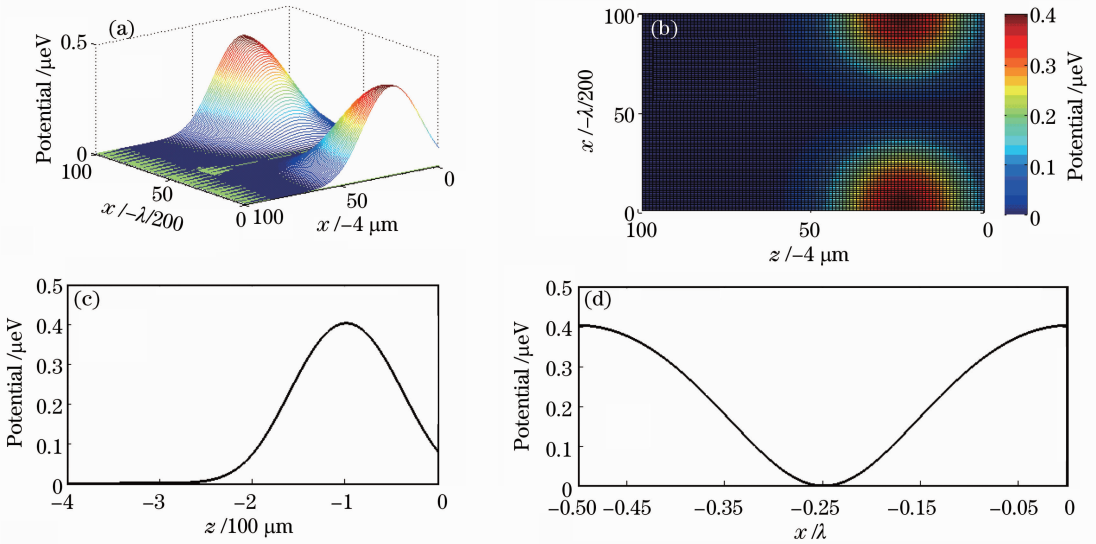


图 4 非衍射情况下的会聚激光驻波场光学势阱。(a)光学势阱一个周期内的三维结构;(b)光学势阱的俯视图;(c)光学势阱在  $x=0$  截面内沿  $z$  轴的方向分布;(d)光学势阱在  $z=23$  截面内沿  $x$  轴的方向分布

Fig. 4 Optical potential of focused laser standing wave field without diffraction. (a) 3D structure of optical potential well within one period; (b) vertical view of optical potential well; (c) intensity distribution of optical potential well along  $z$  direction at  $x=0$ ; (d) intensity distribution of optical potential well along  $x$  direction at  $z=23$

离[见图 5(c)],这和文献[17]的结论相同。图 5(c)和图 5(d)还显示,在  $b_0 = -\omega_0$  这种情况下,衍射与否并不影响会聚平面内原子波包几率密度的会聚特性,即这个平面内原子波包几率密度分布的中心值和半峰全宽(FWHM)都不变。这主要是因为,在  $b_0 = -\omega_0$  时,基片衍射只会使光学势阱在  $z$  方向上

围绕着原来的高斯型分布产生强度振荡,而不会改变光学势阱最大值的位置。

图 6 给出了参量  $b_0 = 0$ ,即入射激光被基片沿光轴切掉一半时的仿真结果。其中,图 6(a)为衍射与否两种情况下原子波包几率密度和光学势阱强度在  $x=50$  这个截面内沿  $z$  方向的变化情况,图 6(b)给

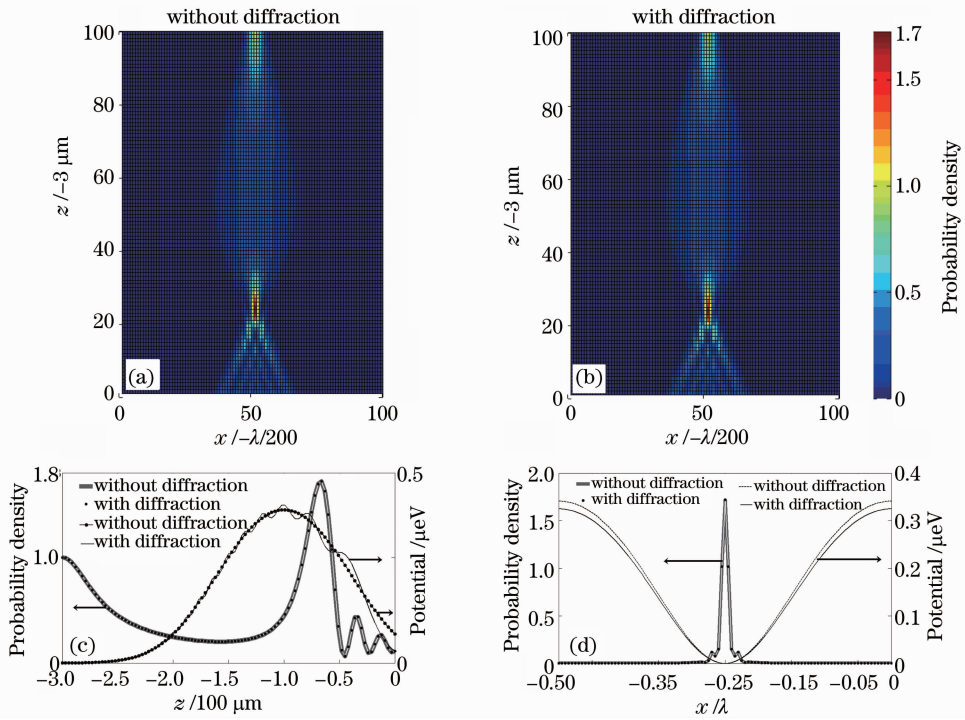


图 5 原子波包经过光学势阱前后的演化 ( $b_0 = -w_0$ )。 (a) 基片衍射时的被包演化过程; (b) 非基片衍射时的波包演化过程; (c) 波包几率密度和光学势阱在  $x=50$  处沿  $z$  方向的变化; (d) 波包几率密度和光学势阱在会聚平面内沿  $x$  方向的变化情况

Fig. 5 Evolution of the atom wave packet through the optical potential well ( $b_0 = -w_0$ ). (a) Evolution of wave packet with diffraction; (b) evolution of wavepacket without diffraction; (c) probability density of wavepacket and intensity of optical potential well along  $z$  direction at  $x=50$ ; (d) probability density of wave packet and intensity of optical potential well along  $x$  direction in focusing plane

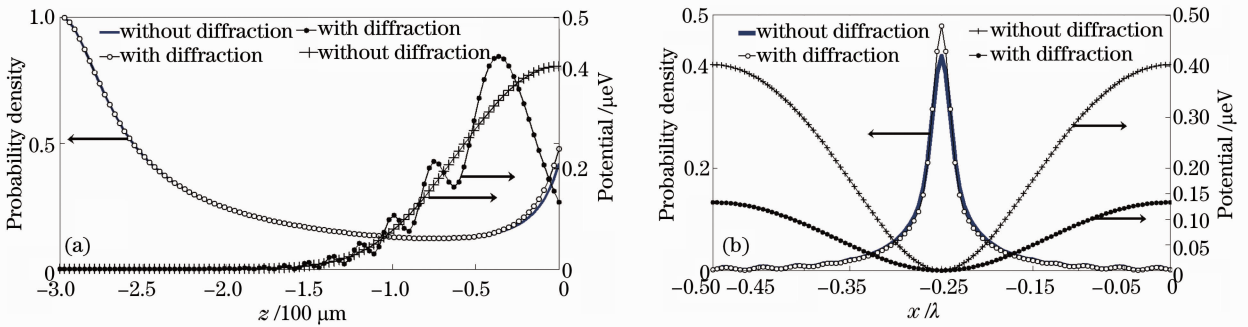


图 6 原子波包经过光学势阱前后的演化 ( $b_0 = 0$ )。 (a) 原子波包几率密度和光学势阱在  $x=50$  截面内沿  $z$  方向的变化; (b) 原子波包几率密度和光学势阱在基片沉积表面内沿  $x$  方向的变化

Fig. 6 Evolution of the atom wave packet before and after the influence of the optical potential well ( $b_0 = 0$ ). (a) Wave packet probability density and optical potential well along  $z$  direction at  $x=50$ ; (b) wave packet probability density and optical potential well along  $x$  direction on the surface of substrate

出了衍射与否两种情况下原子波包几率密度和光学势阱强度在基片沉积表面内沿  $x$  方向的变化情况。

从图 6 可以看出,在  $b_0 = 0$  时,基片衍射仍然会使光学势阱在  $z$  方向上形成振荡分布,不过此时,光学势阱的最大值会向着原子波包初始位置[图 6(a)中  $z = -0.3 \text{ mm}$  位置]方向移动。这样,相比非衍

射情况,此时光学势阱在基片沉积表面上沿  $x$  轴方向上的强度会有所降低[见图 6(b)]。不过,正如图 5(c)所示,光学势阱的最大值和原子波包几率密度的会聚平面之间有一定的距离,当  $b_0 = 0$  时,基片衍射会使原子波包几率密度的会聚平面随着光学势阱的最大值向着原子波包初始位置移动。这样的结



果就是图 5(b):基片衍射效应会提高原子波包几率密度分布的中心值(0.4785),使之变为非衍射情况下的 1.14 倍,减小原子波包几率密度分布的半峰全宽(11.1 nm),使之变为非衍射情况下的 0.82 倍。

从前面的理论分析和仿真图像中可以看出,参量  $b_0$  表示能够进入图 2 透光区  $\Sigma$  内入射激光截面的大小,所以它的大小就会明显地影响光学势阱在

$z$  方向和  $x$  方向上的分布,进而影响原子波包几率密度的会聚效果。为此,细致地考察了衍射与否两种情况下参量  $b_0$  对原子波包演化的影响。图 7(a) 给出了原子波包几率密度会聚平面与基片沉积表面之间距离随  $b_0$  的变化,图 7(b) 为会聚平面内原子波包几率密度分布中心值和半峰全宽随  $b_0$  的变化。

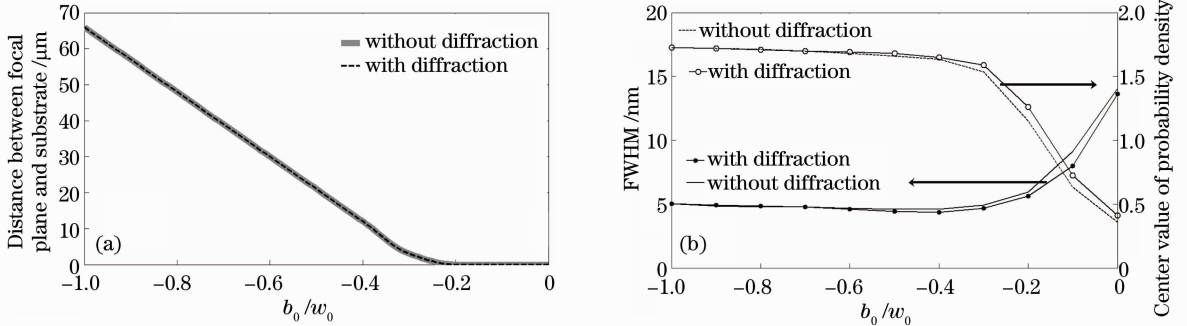


图 7 衍射与否两种情况下参量  $b_0$  对原子波包演化的影响。(a)波包几率密度会聚平面与基片沉积表面之间的距离随  $b_0$  的变化;(b)会聚平面内原子波包几率密度分布中心值与半峰全宽随  $b_0$  的变化

Fig. 7 Effects of  $b_0$  on evolution of the atom wave packet with or without diffraction. (a) Changes of distance between focal plane and substrate with  $b_0$ ; (b) changes of center value and FWHM of probability density with  $b_0$

图 7(a)显示,不管参量  $b_0$  取值如何,衍射与否并不影响原子波包几率密度会聚平面的位置。当  $b_0 = -0.2\omega_0$  时,这个会聚平面正好落在基片沉积表面上。图 7(b)显示,参量  $b_0$  的不同取值会影响会聚平面内原子波包几率密度分布的半峰全宽和中心值的大小,即相比非衍射情况,基片衍射会提高原子波包几率密度分布的中心值,减小其半峰全宽。另外,随着参量  $b_0$  的减小,会聚平面逐渐和基片沉积表面重合,衍射与否两种情况下产生的几率中心值之差,半峰全宽之差会越来越大。笔者认为这种差值来源于基片衍射造成的光学势阱最大值的突然提高以及这个最大值向原子波包初始位置的移动,如图 6(a)所示。这样,同等情况下,基片衍射会使作用原子波包的偶极力随之提前起作用,因此波包几率密度的会聚效果得到改善。实验中,希望原子波包几率密度的会聚平面正好位于基片沉积表面,以便获得精细度较好的沉积条纹。从图 7 的仿真结果来看,实验中应使用参量  $b_0 = -0.2\omega_0$ ,这样衍射时原子波包几率密度分布的中心值为 1.26,其半峰全宽为 5.62 nm,两者分别为非衍射时的 1.1 倍和 0.94 倍。

## 4 结 论

基于激光会聚铬原子束沉积实验中会聚激光、

基片和全射镜之间的相互位置关系,利用标量衍射理论分析了基片衍射对会聚激光驻波场中原子波包几率密度演化的影响。仿真结果显示基片衍射与否并不影响原子波包几率密度会聚平面的位置,改变的只是会聚平面处原子波包几率密度分布的中心值和半峰全宽,并且这种影响随着参量  $b_0$  的变化而变化。相比非衍射情况,基片衍射会使光学势阱发生强度突变,进而会使会聚平面处原子波包几率密度分布的中心值增大,半峰全宽减小。另外,参量  $b_0$  的变化会改变原子波包几率密度会聚平面与基片沉积表面之间的距离。研究结果从基片衍射方面为实验提供了更加丰富的理论指导。

**致谢** 非常感谢中国计量学院沈常宇副教授和董前民副教授等有意义的讨论。

## 参 考 文 献

- 1 S. Chu. The manipulation of neutral particles[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1998, **70**(3): 685~706
- 2 Jiao Xiaoguang, Yin Cong, Shi Chunying *et al.*. Thermometry of Cr laser cooling via knife-edge[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0708004  
焦晓光,殷 聪,石春英等. 刀口法测量铬原子激光冷却温度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0708004
- 3 Chen Liya, Yin Jianping. An improved hollow optical trap for cold atoms (molecules) with phase modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1217~1222

- 陈丽雅, 印建平. 采用相位调制实现冷原子或冷分子囚禁的改进型空心光阱[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1217~1222
- 4 Wang Zhaoying, Wu Zhenjing, Lin Qiang. The relation between the atom interference fringe and the measurement precision of gravity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3541~3544  
王兆英, 吴珍菁, 林强. 原子干涉条纹与重力加速度测量精度的关系[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3541~3544
- 5 Chunyan Shi, Wei Rong, Zichao Zhou *et al.*. Proposal of a dual-ball atomic fountain clock[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(4): 040201
- 6 J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm *et al.*. Laser focused atomic deposition[J]. *Science*, 1993, **262**(5): 877~880
- 7 Lu Xiangdong, Li Tongbao, Ma Yan *et al.*. Investigation of atom optical properties of laser focused Cr atomic deposition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(12): 8205~8211  
卢向东, 李同保, 马艳等. 激光会聚 Cr 原子沉积的原子光学特性研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(12): 8205~8211
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 Yan Ma, Tongbao Li, Wen Wu *et al.*. Laser-focused atomic deposition for nanoscale grating[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(7): 073202
- 12 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
- 13 J. J. McClelland, W. R. Anderson, C. C. Bradley *et al.*. Accuracy of nanoscale pith standards fabricated by laser-focused atomic deposition[J]. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2003, **108**(2): 99~113
- 14 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
- 15 T. Kidan, A. Joan, A. Ron. Numerical simulations of an atomic beam focused by an optical potential[J]. *Computers in Physics*, 1998, **12**(5): 471~477
- 16 Zhang Baowu, Ma Yan, Zhao Min *et al.*. 3-D simulation of nano-grating by Cr atom beam deposition[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(3): 364~367  
张宝武, 马艳, 赵敏等. 铬原子束沉积纳米光栅结构的三维仿真[J]. 激光技术, 2011, **35**(3): 364~367
- 17 Ming He, Ruohong Li, Xiaorui Wang *et al.*. Numerical simulation of one-dimensional atom lithography[J]. *Chin. J. Comput. Phys.*, 2004, **21**(3): 327~332

栏目编辑: 李文喆