

文章编号: 1001-3806(2014)03-0380-04

基片表面的倾斜度对光学势阱的影响

张宝武¹, 支理想¹, 王道档^{1,2}

(1. 中国计量学院 计量测试工程学院, 杭州 310018; 2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了研究原子光刻实验中基片对汇聚激光场的影响, 基于几何光学, 采用数值仿真的方法, 研究了基片表面的倾斜度对光学势阱的影响。结果表明, 当基片表面相对于激光驻波中轴线正倾斜时, 基片表面会形成一个无光场区, 使光学势阱为 0, 且在 z 方向上光学势阱会发生一个零值突变; 当基片表面相对于驻波中轴线负倾斜时, 基片表面永远存在光场, 在 z 方向上光学势阱不会发生零值突变, 且光学势阱相对于 $z=0$ 会出现对称现象。该研究结果对激光汇聚原子沉积实验具有指导意义。

关键词: 激光技术; 激光驻波场; 高斯激光; 倾斜度

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.03.021

Effect of substrate surface slope on optical potential

ZHANG Baowu¹, ZHI Lixiang¹, WANG Daodang^{1,2}

(1. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study effect of substrate on the focusing laser field in atom lithograph, based on geometrical optics and numerical simulation, effects of substrate surface slope on optical potential were studied. The results indicate that when the substrate surface has positive slope related to the laser standing wave axis, there is an area without light illumination on the surface whose optical potential is zero, and the curve of optical potential in z direction will suddenly vanish; when the substrate surface has negative slope related to the laser standing wave axis, all the surface will be illuminated by the laser and the curve of optical potential in z direction will vary smoothly to zero, and the optical potential will be symmetric related to $z=0$. The results are useful for the experiment of laser-focusing atom deposition.

Key words: laser technique; laser standing wave field; Gaussian laser; slope

引言

由于原子跃迁频率一般不受外界环境的影响, 并且能够被准确地测量, 由它支撑的原子频标为人类提供了十分稳定准确的秒长, 为精密校频等物理学的测量、人造卫星的发射、运动目标的精密定位、快速数字通信等领域提供了稳定度高、均匀性好

的时间标准^[1]。

激光汇聚原子沉积技术利用激光和原子之间的共振作用制作纳米结构, 为纳米尺度结构标准的研制提供了一种新的方法^[2-3]。至今它已经在钠、铬、铝、铁和镱等原子上成功实现了 1 维纳米光栅结构的制作。实验中, 单频激光通过主动稳频方式被锁定在相应原子共振跃迁频率附近 (一般蓝失谐几百兆赫兹之内), 形成稳定的驻波场。在合适的激光强度和频率失谐情况下, 每个激光驻波波节就会呈现透镜的功能, 当准直原子束穿过它的时候就会在此汇聚^[4-6]。如果在激光束下边平行激光驻波中轴线放置一块基片, 则汇聚的原子就会在基片沉积上形成一系列的条纹^[7-12]。经研究, 相邻沉积条纹之间的平均距离在 10^{-5} 量级上很好地复现了激光驻波场周期^[2]。由于激光频率通过稳频锁定在原子共振线上, 而基片表面又平行激光中轴线, 这样获得

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11064002); 浙江省自然科学基金资助项目 (LQ13F050002); 广西省自然科学基金资助项目 (2012gxnsfaa53229; 2013GXNSFDA019002); 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金资助项目; 广西省自动检测技术与仪器重点实验室基金资助项目 (YQ14206)

作者简介: 张宝武 (1978-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为原子光刻技术。

E-mail: zhangbaowu1978@gmail.com

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-09-02

的1维纳米光栅结构也就能直接溯源于原子频率。由此可见,驻波中轴线和基片表面平行度是决定相邻条纹间距复现驻波周期准确度的重要因素。为此,作者通过数值计算,在几何光学框架内仿真研究了这种平行度对光学势阱的影响,同时将其和准直激光束情况下的结果进行比较。

1 理论分析

理论仿真所依据的实验装置如图1所示,其中准直原子束沿着z轴方向自上而下传播,汇聚激光束沿着x轴自左向右传播。激光垂直入射到反射镜上,然后被原路反射和其自身叠加,构成汇聚驻波场。为了仿真方便,假设入射激光的束腰严格位于反射镜的镜面上,并且入射激光的中轴线严格垂直于反射镜表面。这样的结果就是入射激光和其自身的反射激光会完全重合,激光中轴线和基片沉积表面之间的夹角 α 也就不会包含在光学势阱表达式中,只是在程序编写过程中设置一个倾角参量就行。另外,参量 x_0 表示基片表面x轴上某一个特定的垂轴截面的坐标。

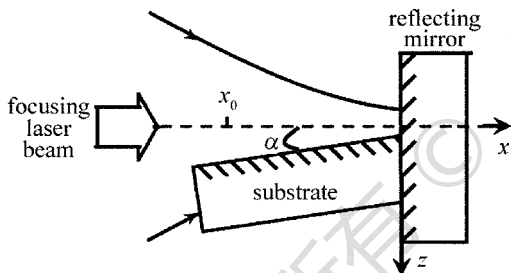


Fig. 1 Relative position of laser, substrate and reflecting mirror

入射高斯激光在传播途中任一点P的复振幅 \bar{E}_1 表示为^[13]:

$$\bar{E}_1 = \frac{E_0}{w(x)} \exp\left[-\frac{z^2 + y^2}{w^2(x)}\right] \times \exp\left[ik\left(x + \frac{z^2 + y^2}{2R(x)}\right)\right] \quad (1)$$

式中,x,y和z为直角坐标; E_0 为激光中轴线上的振幅; $w(x)$ 为x位置处激光束的截面半径; $R(x)$ 为x位置处激光波面曲率半径,k为激光波数。

理想情况下,激光束被假设成准直激光以后,则它在传播过程中将保持束腰大小不变,也就是说(1)式改写成:

$$\bar{E}_1 = \frac{E_0}{w_0} \exp\left[-\frac{z^2 + y^2}{w_0^2}\right] \exp(ikx) \quad (2)$$

式中, w_0 为激光束腰半径。

与(1)式和(2)式相对应的反射激光可以认为是入射激光经过反射镜的镜像加上半波损失获得的,记为 \bar{E}_2 ,则两者叠加形成的光强表达式为:

$$I = (\bar{E}_1 + \bar{E}_2)(\bar{E}_1 + \bar{E}_2)^* \quad (3)$$

式中,*表示复共轭。

将(3)式代入到光学势阱表达式^[14]中可得:

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

式中, \hbar 为除以 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表示强度, I_s 为原子跃迁的饱和强度。

2 仿真结果和讨论

在利用(4)式进行数值仿真的过程中用到的参量如下:与⁵²Cr原子共振跃迁 $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ 对应的激光波长为 $\lambda = 425.55\text{nm}$,跃迁谱线的自然线宽 $\Gamma = 2\pi \cdot 5\text{MHz}$,饱和光强 $I_s = 85\text{W/m}^2$,激光失谐量 $\Delta = 2\pi \cdot 250\text{MHz}$ 。另外,激光束腰为 $w_0 = 0.1\text{mm}$,入射激光功率为 $P_0 = 3.93\text{mW}$ 。仿真过程中,直角坐标系的原点设置在基片表面、驻波中轴线和反射镜表面三者相交处,x轴的原点设在反射镜处,z轴的原点设置在基片沉积表面。激光中轴线位于 $z = 0$ 的平面内且重合与x轴。基片在x方向上的展宽幅度为10mm。另外,x方向上任何位置 x_0 处的仿真范围为大于 x_0 绝对值的第1个波长,即 $x \in [x_0, |x_0| + \lambda]$, α 角的仿真范围为 $[-2, 2]\text{mrad}$ (记顺时针为正),z方向上的仿真范围为大于 x_0 绝对值的第1个驻波波节位置处 $z \in [-1.5w_0, -x_0\alpha]$ 。

首先仿真了特定位置 x_0 处基片表面驻波光学势阱随倾角的变化情况,如图2所示,其中,同时给出了准直高斯激光(仿真图中用“collimated laser”表示)相同条件下光学势阱随倾角的变化。从图2中可以看出,在波节位置处,准直高斯激光会给出零值的光学势阱,并且不会随着倾角的变化而变化。而非准直高斯激光光学势阱不但不会呈现零值,而且随着倾角的不同而不同。当倾角为正值时,基片相对于驻波中轴线的位置如图3a所示。这样,在光线直线传播框架内,当入射激光被基片阻挡后,基片表面之上和激光场之间的区域内将不存在光场。因此基片表面的光学势阱必为0。当倾角为负值时,基片表面相对于驻波中轴线的位置如图3b所示。这样,激光束会沿着基片表面倾斜传播。因此,整个基片表面将被光场覆盖。此时,在特定倾角下,随着

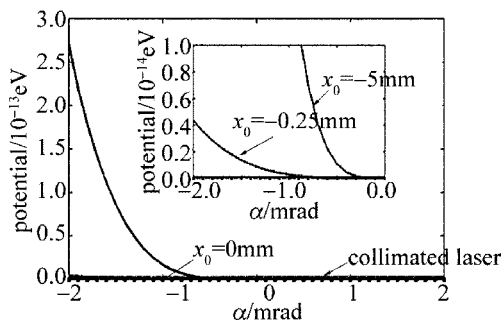


Fig. 2 Relationship between optical potential and slope angle at fixed x_0 position

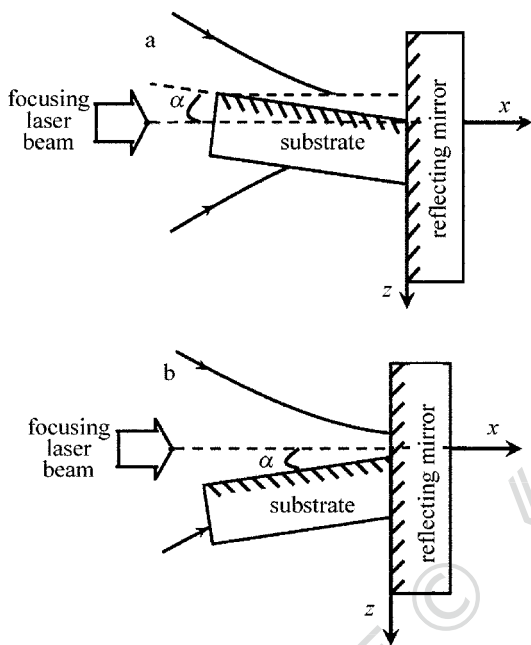


Fig. 3 Relative position of substrate surface to laser standing wave axis at different slope angle

x_0 绝对值的增大, 基片表面光学势阱值随之增大 (见图 2 的内插图)。这个波节处非零值光学势阱的出现缘自于非准直高斯激光的非平面波前。

考察 $\alpha = \pm 2\text{mrad}$ 两种情况下, $x_0 = 0\text{mm}$ 处驻波光学势阱在基片表面 x 方向和垂直于基片表面 z 方向上的变化, 如图 4 所示, 其中, 同时给出了准直高斯激光 (仿真图中用“collimated laser”表示) 相同条件下光学势阱的变化。图 4a 为倾角 $\alpha = -2\text{mrad}$ 时 x 方向上光学势阱的变化, 图 4b 和图 4c 为不同倾角下 z 方向的变化。鉴于图 2 的结论, 即当 $\alpha = 2\text{mrad}$ 时, 基片表面光学势阱为 0, 这里就不再单独给出此时光学势阱在基片表面 x 方向上的变化曲线。

图 4a 显示, 高斯激光准直与否两种情况下, 光学势阱在 x 方向上虽然其驻波形式的变化趋势不随 x_0 的变化而变化, 但是最大值都随 x_0 值的变化而变

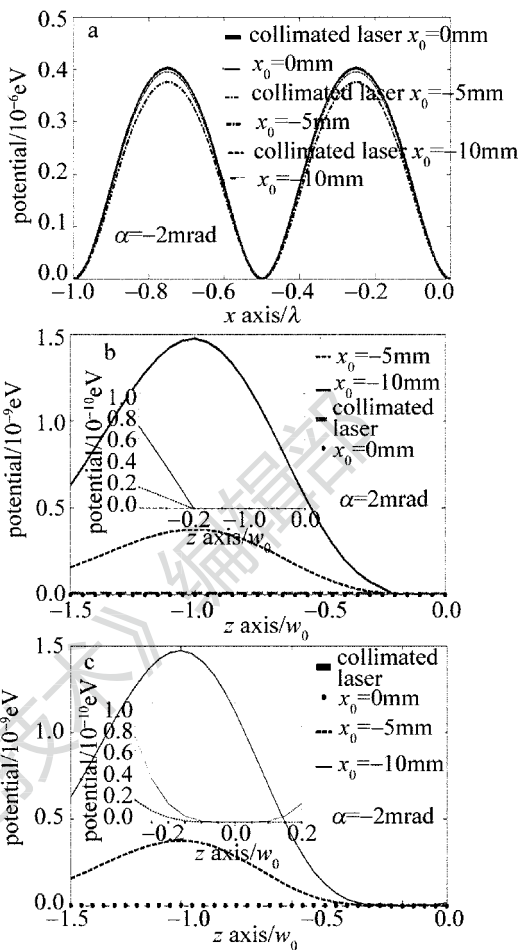


Fig. 4 Variations of optical potential at fixed slope angle
a— x direction b, c— z direction

化: 在 $\alpha = -2\text{mrad}$ 时, 任何 x_0 值处基片表面光学势阱的最大值随 x_0 绝对值的增大而减小。仔细对比准直与否两种情况发现: 除 $x_0 = 0$ 位置处, 其它每个 x_0 位置上非准直高斯激光的最大值都略小于准直高斯激光。图 4b 和图 4c 显示, 不管倾角大小如何, 高斯激光准直被准直处理以后, 光学势阱在相应驻波的波节处沿 z 方向上的变化都不随 x_0 值的变化而变化, 永远保持零值不变。而非准直光学势阱在不同倾角情况下沿 z 方向的变化比较复杂一些。不管倾角方向如何, 不同 x_0 位置处, 光学势阱在 z 方向上的变化都呈现一种类似于麦氏速率分布的曲线, 不同之处在于不同的倾角方向给出的曲线尾部趋零方式不同。当 $\alpha = 2\text{mrad}$ 时, 所有曲线都在 $z = -0.2w_0$ 位置处突变为 0 (见图 4b 的内插图)。这可以从图 3a 的几何结构推算出来: 基片表面沿 x 方向的宽度为 10mm , 倾角 $\alpha = 2\text{mrad}$ 的情况下 z 方向形成的阴影距离将是 $0.2w_0$ 。在 $\alpha = -2\text{mrad}$ 情况下, 光学势阱随 z 的变化曲线永远是平滑变化的, 并

且相对于 $z = 0$ 会出现对称现象(见图 4c 的内插图),这可以从图 3b 中的几何结构得到解释,即在这种情况下,激光中轴线对称位置处都会有光场存在,并且是 z 绝对值相同的点,其光学势阱也必然相等。

3 结 论

针对激光汇聚铬原子沉积实验,研究了驻波中轴线与基片表面的平行性对光学势阱的影响。研究过程将入射激光准直与否两种情况下的光学势阱变化进行了对比。仿真结果显示,当基片表面相对于驻波中轴线倾斜方向不同时,基片表面光学势阱大小不同。本文中的研究现在仅限于光的直线传播,没有考虑基片对汇聚激光场的衍射,笔者日后将对此进行补充研究。

参 考 文 献

- [1] QIU S, ZHANG J H. From CPT clock to optical clock[J]. *Annals of Shanghai Astronomical Observatory*, 2007, 28: 166-171 (in Chinese).
- [2] 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.
- [3] LI T B. Nanometrology and transfer standard[J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2005, 32(1): 8-13 (in Chinese).
- [4] LI Y Q, XIONG X M, ZHANG W T. 3-D analysis of laser-cooling Cr atoms[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 788-792 (in Chinese).
- [5] ZHU B H, HUANG J, ZHANG B W, *et al.* Distribution of chromium atoms in 1-D optical molasses[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 833-835 (in Chinese).
- [6] ZHANG B W, MA Y, ZHANG P P. Simulations of transverse position distributions of Cr atomic beam pre-collimated by three apertures[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3): 398-401 (in Chinese).
- [7] MA Y, LI T B, WU W, *et al.* Laser-focused atomic deposition for nanoscale grating[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(7): 073202.
- [8] ZHANG W T, ZHU B H, XIONG X M. The research of motorial characteristic of sodium atoms in standing wave field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 033201 (in Chinese).
- [9] ZHANG P P, MA Y, ZHANG B W, *et al.* Properties of 3-D nanostructures fabricated by laser-focused Cr atomic deposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1114001 (in Chinese).
- [10] ZHANG B W, ZHI L X, ZHANG W T. Simulations of optical potential formed resulted from Gaussian laser standing wave based on diffraction by straight edge[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 183201 (in Chinese).
- [11] ZHANG B W, MA Y, ZHAO M, *et al.* 3-D simulation of nano-grating by Cr atom beam deposition [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(3): 364-367 (in Chinese).
- [12] ZHANG B W, MA Y, ZHANG P P, *et al.* Simulations of Gaussian laser standing wave based on diffraction by straight edge[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 810-813 (in Chinese).
- [13] YU D Y, TAN H Y. *Engineering optics*[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 6, 378-384 (in Chinese).
- [14] ANDERSON W R, BRADLEY C C, McCLELLAND J J, *et al.* Minimizing feature width in atom optically fabricated chromium nanostructures[J]. *Physical Review*, 1999, A59(3): 2476.