

文章编号: 1007-4627(2002)02-0199-03

厚透镜近似下激光驻波场中原子动力学研究*

何 明, 王 谨, 詹明生

(中国科学院武汉物理与数学研究所, 波谱与原子分子国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 研究了在厚透镜近似下, 原子在激光驻波场中的动力学行为. 通过直接演化一维薛定谔方程, 发现当激光的强度较大时, 原子束将会聚焦形成几个焦点. 如果激光的强度更大, 驻波场中的原子将会出现一种“隧道”现象, 此时, 原子受一些实验参数(如焦平面位置、激光强度等)的影响程度将大大降低. 这种现象有利于提高原子在驻波场中聚焦沉积的效果.

关键词: 原子光学; “隧道”现象; 激光驻波场

中图分类号: O562 **文献标识码:** A

近年来, 利用光场对原子进行操纵得到了广泛的研究. 原子刻蚀^[1]结合了原子在基片上沉积和原子在驻波场中的聚焦, 从而得到了特别的关注. 因为原子的德布罗意波长很小, 原子刻蚀可以获得很高清晰度的沉积条纹. 到目前为止, 已经实现原子光刻的元素包括: Na, Cr, Cs 和 Al^[2-5].

我们在以往的工作中分析了原子在激光驻波场中的行为, 发现一些参数, 如原子的速率分布、激光的强度等, 能够影响原子的聚焦^[6]. 通过直接的数值模拟, 我们发现原子在驻波场中的焦距与原子的径向速度和激光的失谐量成正比, 与激光的强度和束宽成反比. 在实验中, 要想获得理想的单一速度的原子束是很困难的, 因此如果找到一种途径来避免这些参数影响, 将大大提高原子束在驻波场中沉积的效果.

本文将主要研究厚透镜近似下原子在激光驻波场中的动力学行为, 由绝热近似能够得到一维薛定谔方程

$$i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \frac{\hbar}{2} \Delta + U(x, t) \right] \Psi(x, t), \quad (1)$$

这里 m 是原子的质量, Δ 是激光场的失谐量, $U(x, t)$ 代表激光的光场. 考虑到自发辐射效应, 我们假定光场有这样的形式 $U(x, t) = U(x)G(x, t)$ ^[7], 其中 $U(x)$ 为

$$U(x) = \frac{\hbar^2}{2} \Delta \ln(1 + p), \quad (2)$$

式中 $p = 2\Omega^2 / (4\Delta^2 + \Gamma^2)$ 为饱和系数, 这里 Γ 是原子与光场共振的自然线宽, Ω 为拉比频率, $G(x, t)$ 如文献[7]所示.

在数值模拟中, 假定原子绝热的停留在基态^[8, 9]. 利用劈裂算法^[10]可以很方便地解含时薛定谔方程. 在这里, 我们考虑 Cr 原子, 相应的能级跃迁为 $7S_3 \rightarrow 7P_4^0$, 跃迁的波长为 425.6 nm. 为便于比较, 所有计算参数取自文献[7, 8]. 激光强度取为 $I_0 = 1.98 \times 10^5 \text{ w/m}^2$, 原子径向速度取为 $v_0 = 926 \text{ m/s}$, 激光失谐量和激光 $1/e^2$ 束宽分别为 $\Delta_0 = 2\pi \times 200 \text{ MHz}$ 和 $rad_0 = 0.195 \text{ mm}$. 本文中, 我们只考虑激光处于左旋偏振的状态^[11]. 数值计算的格点大小取为 $\Delta t = 10.529 \text{ ns}$ 和 $\Delta x = 8.512 \text{ nm}$, 驻波场沿传播方向包络函数的中心位置取为 $80 v_0 \Delta t$ (即 $4rad_0$), 在 x 方向上的计算范围为 $-3\lambda/4 \leq x \leq 5\lambda/4$ (两个波长). 最后所得结果为原子几率密度 $\rho(x, t) = |\Psi(x, t)|^2$.

当计算所需的参数按照文献[7, 8]选定后, 原子几率密度在 x 轴中心位置沿传播方向的变化曲线如图 1 所示. 图中原子几率密度的最大值处在 $t_f = 81.33 \Delta t$ 的位置, 我们将其设为原子沉积的聚焦平面位置. 从图中可以发现, 所得的焦平面位置与激

收稿日期: 2002-03-26; 修改日期: 2002-05-09

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10074072)

作者简介: 何 明(1975-), 男(汉族), 湖南衡阳人, 博士研究生, 从事原子分子物理实验和理论研究.

光的高斯包络曲线的中心位置存在一定的偏移, 这个结果和文献[8]的计算结果是相吻合的.

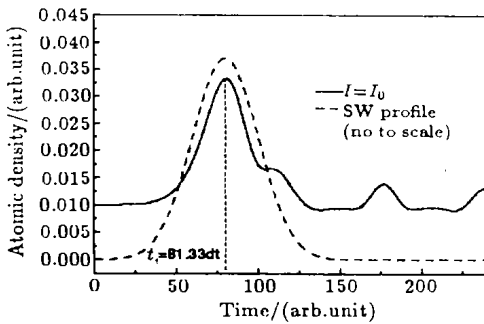


图 1 原子几率密度 σ_x 在 x 轴中心位置沿传播方向的演化
---为激光驻波场沿传播方向的包络曲线.

在研究激光驻波场中原子束成像的过程中, 驻波光场通常被近似看作薄透镜或厚透镜^[12]. 作薄透镜近似时(光场的强度较小), 由于原子和光场的作用力比较小, 因此仅仅在距离驻波场较远的地方才能形成原子几率密度的最大值(焦点). 而作厚透镜近似时(光场的强度较大), 如图 1 所示, 初始的原子波函数将在激光的高斯包络曲线中心附近形成几率密度的最大值(焦点).

到现在为止, 人们主要研究的都是原子在驻波场中形成一个焦点的情况(即简单聚焦), 有理由相信, 当激光的强度大于原子简单聚焦所需的光场强度时, 原子的动力学行为将会变得更加复杂.

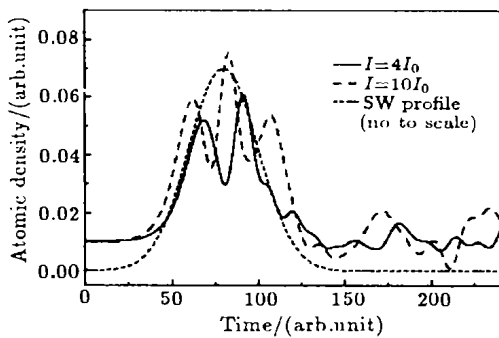


图 2 原子几率密度在 x 轴中心位置沿传播方向的演化曲线

如图 2 所示, 当激光强度的值比较大时(即 $I > I_0$), 我们发现在距离第一个焦点一定距离的地方又出现了其它焦点. 这是由于在光场强度比较大的情况下, 原子在经历第一次聚焦作用后, 仍处在激光的光场范围内, 继续受到光场对原子的向心作用力, 从而得以形成新的焦点. 经过进一步的计算发现, 随着激光光场强度的增加, 由于光场的作用原

子所得到的焦点数目也相应增加. 由图 2 可见, 当激光强度 $I=4I_0$ 时, 相应的焦点数为 2; 而 $I=10I_0$ 时, 相应的焦点数为 3. 将图中的两条曲线做一下比较, 我们还可以发现, 如果激光的强度增大, 那么其相邻焦点的距离则减少.

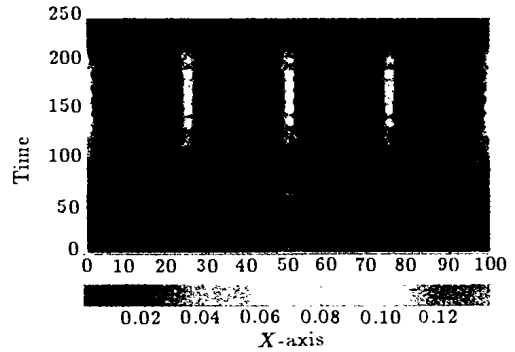


图 3 原子通过激光驻波场的演化图(此时激光强度选为 $I=1\ 000\ I_0$)

原子在激光强度较大的驻波场中表现出一些有趣的原子光学特性. 如果激光的强度进一步加大, 可以预见到, 由于相邻焦点的距离持续减少, 将会形成一个在传播方向上的原子聚焦的相对比较连续的区域. 在这个区域内, 原子聚焦成像受一些实验参数的影响程度将大大降低, 如沉积基片的位置、原子的初始速度分布等^[6]. 原子在驻波场中的这种行为在前人的工作中被称为“隧道”^[12], 即原子在驻波场中的运动将被局限着沿驻波场的波节运动.

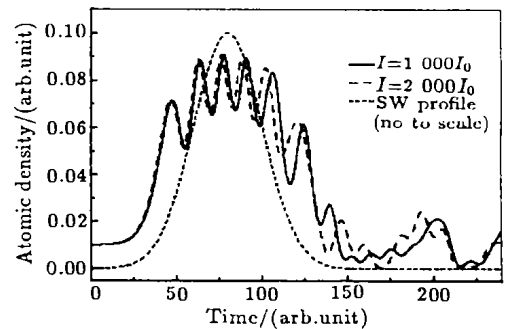


图 4 原子几率密度在 x 轴中心位置沿传播方向的演化

当激光的强度提高到 $I=1\ 000\ I_0$ 的情况下时, 如图 3 所示, 我们可以得到一个“隧道”现象. 图中 x 轴方向展示的为两个波长的长度(即 $-3\lambda/4 \leq x \leq 5\lambda/4$), 纵轴传播方向上的演化距离为 $12\ rad$, 我们可以观察到几个原子聚焦区域(见图中由许多焦点组成的连线).

为方便观察这些原子聚焦区域, 图 4 给出了原子几率密度沿传播方向的变化曲线. 从图中可以观

察到焦平面位置和激光强度的变化对原子在驻波场中聚焦的影响程度已经大大降低了. 图中的实线即对应着图 3 $I=1\ 000\ I_0$ 的情况, 我们看到由于激光的高强度, 这些相邻的焦点互相连接而形成一个聚焦区域, 原子的几率密度在这个范围内只是做细微的波动. 相比图 2 和图 3 中的原子几率密度分布, 此时原子几率密度分布受 x 轴位置的影响程度大为减少. 通过进一步计算, 我们还发现这种“隧道”现象对于其它一些实验参数的敏感也大大降低. 在图

4 中也给出了 $I=2\ 000\ I_0$ 时的原子几率密度沿传播方向分布(虚线), 同样可以观察到“隧道”现象. 在以前的研究中^[6], 我们知道激光的强度是一个影响原子沉积的关键实验参数. 比较图 4 中的两条几率密度曲线分布, 在“隧道”现象出现的范围内, 我们发现两者几率密度的差异相比其间激光强度的差别是很小的. 对于原子光刻这样以获得超精细沉积条纹为目的的实验, “隧道”现象中原子聚焦对实验参数的敏感程度降低有很大的利用价值.

参 考 文 献:

- [1] Prentiss M, Timp G, Bigelow N, *et al.* Using Light as a Steeplight Field[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, **60**: 1 027.
- [2] Timp G, Behinger R E, Tennant D M, *et al.* Using Light as a Lens for Submicron, Neutral-atom Lithography[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**: 1 636.
- [3] McClelland J J, Scholten R E, Palm E C, *et al.* Laser-focused Atomic Deposition[J]. *Science*, 1993, **262**: 877.
- [4] Lison F, Adams H J, Haubrich D, *et al.* Nanoscale Atomic Lithography with a Cesium Atom Beam[J]. *Appl Phys B: Laser Opt*, 1997, **65**: 419.
- [5] McGowan R W, Giltner D M, Lee S A. Light Force Cooling, Focusing, and Nanometer-scale Deposition of Aluminum Atoms[J]. *Opt Lett*, 1995, **20**: 2 535.
- [6] He M, Wang J, Tu X H, *et al.* Quantum-mechanical Simulation of an Atomic Beam Focused by an Optical Standing Wave[J]. *Chin Phys Lett*, 2000, **19**: 292.
- [7] McClelland J J. Atom-optical Properties of a Standing-wave-light Field[J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, **12**: 1 761.
- [8] Cohen J L, Dubetsky B, Berman P R. Atom Focusing by far-detuned and Resonant Standing Wave Fields: Thin-lens regime[J]. *Phys Rev*, 1999, **A60**: 4 886.
- [9] Lee C L. Atom de Broglie Waves in Multiple Optical Standing Wave[J]. *Phys Rev*, 1996, **A53**: 4 238.
- [10] Feit M D, Fleck J A, Steiger A. Solution of the Schrodinger Equation by a Spectral Method[J], *J Comput Phys*, 1982, **47**: 412.
- [11] Lee C L. Quantum-mechanical Analysis of Atom Lithography[J]. *Phys Rev*, 2000, **A61**: 063604.
- [12] Anderson W R, Bradley C C, McClelland J J, *et al.* Minimizing Feature Width in Atom Optically Fabricated Chromium Nanostructures [J]. *Phys Rev*, 1999, **A59**: 2 476.

Dynamics of Atoms in Laser Standing Wave in Regime of Immersion-lens*

HE Ming, WANG Jing, ZHAN Ming-sheng

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The dynamics of atoms in laser standing wave (SW) in the regime of over-focused immersion-lens is studied. Through directly evolving a one-dimensional Schrödinger equation, we find that multiple focusing appears when laser intensity is larger than that required for simple focusing. If laser intensity is much higher than that for the single focusing, a “channeling” phenomenon appears, which is insensitive to the variation of some parameters, such as focal plane position and laser intensity. This “channeling” phenomenon is advantageous for atomic deposition in laser SW.

Key words: atomic optics; channeling; laser standing wave profile

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10074072)