

文章编号: 1001-3806(2012)06-0832-04

1 维光学粘胶作用下铬原子束空间分布特性

朱保华¹ 黄静² 张宝武³ 张文涛¹ 蒋曲博¹ 熊显名¹

(1. 桂林电子科技大学 材料科学与工程学院 桂林 541004; 2. 贵州民族学院 科研处 贵阳 550000; 3. 中国计量学院 测试计量工程学院 杭州 310018)

摘要: 为了研究激光准直场作用下原子束的空间分布状态对纳米光栅沉积制作的影响,基于半经典理论,分析了1维光学粘胶对中性铬原子的作用力特性,利用4阶龙格-库塔数值积分算法对不同激光场强度、不同激光失谐量、不同激光场范围条件下中性铬原子束的空间分布进行了仿真分析。由仿真结果可知,随着激光场强度的增加,原子束的分布向中心区域集中,由于受饱和效应的影响,该种集中的趋势随激光强度的增加而逐渐变缓;同时,当激光失谐量等于原子线宽的一半时,原子束的空间分布最窄。当激光功率为40mW、且失谐量为-2.5MHz时,铬原子束经过1维光学粘胶作用后其空间分布的半峰全宽被压缩为作用前的0.43倍,而原子束密度分布中心值也增大为作用前的1.79倍。结果表明,利用激光准直场的作用可实现原子束空间分布的改善,有利于后续原子沉积以实现纳米光栅的制作。

关键词: 激光光学; 1维光学粘胶; 耗散力; 空间分布

中图分类号: O439 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.030

Distribution of chromium atoms in 1-D optical molasses

ZHU Bao-hua¹, HUANG Jing², ZHANG Bao-wu³, ZHANG Wen-tao¹, JIANG Qu-bo¹, XIONG Xian-ming¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Department of Scientific Research, Guizhou University for Nationalities, Guiyang 550000, China; 3. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to analyze effect of atomic distribution on deposition preparation of nanometer gratings under the action of collimated laser, based on semi-classical theory and Runge-Kutta numerical integration algorithm, the characteristics of dissipative force and the distribution of chromium atoms in 1-D optical molasses was discussed. Then the distribution of chromium atoms was simulated under different laser parameters. The results show that the best distribution appears when the detuning of the laser frequency equals to half of line width of chromium atoms. After the atom beam passing through 1-D optical molasses, its spatial width was suppressed to 0.43 times of that before and the atomic density becomes 1.79 times larger than before, under the condition that laser power equals to 40mW and laser detuning is -2.5MHz. This results show that the atomic distribution can be improved under the action of collimated laser and it's helpful for the deposition preparation of nanometer gratings.

Key words: laser optics; 1-D optical molasses; dissipative force; spatial distribution

引言

沉积型原子光刻技术中,原子束的准直程度对最终的沉积结果有着巨大的影响,即原子束的准直度在很大程度上决定了所形成的沉积条纹的优劣,这主要体现在以下两个方面:(1)由于激光驻波场的势阱对于原子的束缚能力有限,只有那些沿着激光驻波场方

向运动速率较小的原子才能被该驻波场所束缚,故此要求原子束的发散角尽可能要小,这样才能保证原子能被驻波场所“捕陷”,从而按照特定的分布沉积在基板上;(2)原子束发散角的大小还直接决定着沉积条纹的质量,随着原子束发散角的增加,沉积条纹的宽度将会迅速增加,导致条纹质量恶化,故此亦必须保证原子束的发散角要小^[1-2]。而实验中所采用的铬原子束为热原子束,具有较大的发散角度,为此必须寻找相应的方法,使得铬原子束的发散角减小用来获得高准直度的铬原子束,以满足沉积实验的需求。目前实现原子束准直的基本方法有两种:(1)利用机械准直孔来实现原子束的准直,虽然这种方法比较简便、易实施,但是它会造原子通量的大量损失,导致后续沉积时间的加长;(2)利用1维光学粘胶来实现原子束的准直,该方法

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11064002);浙江省科技计划资助项目(2011R10094);广西省自然科学基金资助项目(2012GXNSFAA053229)

作者简介:朱保华(1974-),女,硕士,讲师,主要从事激光技术及系统理论方面的研究工作。

E-mail: uestczrk@126.com

收稿日期:2012-02-07;收到修改稿日期:2012-03-19

不仅能很大程度上降低原子束的发散角,提高原子束的准直度,同时还会增加原子的密度分布,以利于后续的原子沉积^[3]。因此,研究 1 维光学粘胶作用下中性原子的空间分布对原子光刻技术具有重要的意义。

1 1 维光学粘胶对中性原子的耗散力

1 维光学粘胶是由两束相向传播的激光束构成,两激光束具有相同的频率 ω_1 、相同的强度和偏振方向,且激光束的频率调谐至低于原子的共振跃迁频率 ω_0 ,即 $\omega_1 < \omega_0$ (其中下标 1 表示激光光场,0 表示原子)。当原子以速率 v 沿着某一激光束传输方向运动时,由于多普勒频移的存在,就原子而言将会使得与原子运动方向相反传输的激光束容易与原子产生共振,从而使原子发生跃迁,使得原子能从该束激光场中吸收更多的光子,且当 $\omega_1 + kv = \omega_0$ (k 为波矢) 时,原子与激光场实现共振,此时的跃迁概率也达到了最大^[4],如图 1 所示。通过吸收-自发辐射过程使得原子的动量减小,从而实现原子的减速。随着原子速率的不断减小,原子从两激光束中吸收光子的速率也会随之发生变化,直至原子的运动速率变为 0,则上述原子从两光束中吸收光子的速率也就达到了平衡^[5]。

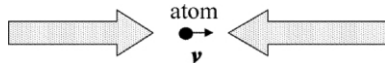


Fig. 1 Schematic of 1-D optical molasses

为了量化 1 维光学粘胶中原子所受到的激光场耗散力,假定两相向传播的激光束是相对独立的,彼此之间没有相互作用和影响,在低激光强度条件下,原子所受到的光学粘胶耗散力可以表示为两相向传播激光束对原子作用力之和^[6-7],即:

$$F_0 = F_+ + F_- = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \cdot \frac{S_0}{1 + S_0 + 4 [(\delta - kv) / \Gamma]^2} - \frac{\hbar k \Gamma}{2} \cdot \frac{S_0}{1 + S_0 + 4 [(\delta + kv) / \Gamma]^2} \quad (1)$$

式中 F_0 表示原子所受激光场的作用合力, F_+ 和 F_- 表示组成 1 维光学粘胶两相向传播的激光束对原子的作用分力, Γ 为铬原子的自然线宽, S_0 为原子的饱和参量(下标 0 表示原子的饱和参量), \hbar 为普朗克常数。忽略(1)式中 $(kv/\Gamma)^4$ 及更高次项,上式的 1 级近似可以表示为^[8]:

$$F_0 \cong - \frac{8 \hbar k^2 \delta S_0}{\Gamma [1 + S_0 + (2\delta/\Gamma)^2]^2} v = -\beta v \quad (2)$$

式中 δ 为激光场失谐量, v 为原子的横向运动速度, $\beta = \frac{8 \hbar k^2 \delta S_0}{\Gamma [1 + S_0 + (2\delta/\Gamma)^2]^2}$ 为阻尼系数。在数值计算过程中所使用的参量分别为:激光波长 $\lambda = 425.55 \text{ nm}$, 激

光失谐量 $\delta = 200 \text{ MHz}$, 铬原子饱和强度 $I_s = 85 \text{ W/m}^2$, 铬原子自然线宽 $\Gamma = 5 \text{ MHz}$ 。

图 2 中给出了 $S_0 = 1$, $\delta = -\Gamma$ 条件下原子运动速率与所受激光场耗散力之间的关系。图中两条虚线描述的是两相向传输的光束对原子的作用力,实线表示两光束对原子作用的合力。从图中可以看出,当 $\delta < 0$ 时,激光场与原子之间的作用力与原子的运动方向相反,对原子的运动所体现出来的是一种阻尼作用。激光场对原子的耗散力在原子速率 $v = \pm \Gamma/k$ 时具有最大值,对于铬原子的 ${}^7P_4 \rightarrow {}^7S_3$ 能级跃迁,相应的速率为 $\pm 2.13 \text{ m/s}$ 。而当原子速率进一步增大时,该作用力将会急剧减小。由于该激光场对原子的耗散力 F_0 在 $v < \Gamma/k$ 范围内与原子速率大小成线性关系,故此可以将 $v_c = \Gamma/k$ 定义为激光冷却场的捕获速率。该捕获速率所描述的是激光场所能冷却的最大原子运动速率,它与原子的线宽成正比。当原子的运动速率 $v < v_c$ 时,激光场能实现对原子的有效冷却,而当原子的运动速率 $v > v_c$ 时,由于此时激光场的作用力急剧减小,激光场对原子的阻尼力也变的非常微弱,从而不能实现有效的激光冷却。

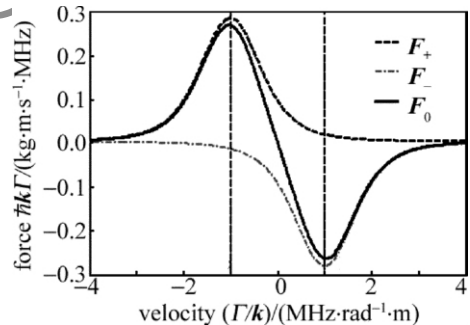


Fig. 2 The relationship between force and velocity

铬原子对应的跃迁能级为 ${}^7P_4 \rightarrow {}^7S_3$, 相应的跃迁波长为 $\lambda = 425.55 \text{ nm}$, 故每个光子所携带的动量为 $\hbar k = 15.6 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, 该跃迁所对应的寿命为 31.77 ns , 假定有 50% 的粒子处于激发态,则激光场中铬原子所能获得的阻尼力高达 $2.46 \times 10^{-20} \text{ N}$, 相应的加速率为 $2.8 \times 10^5 \text{ m/s}^2$, 这要远远大于电场或磁场所带来的效应。

2 1 维光学粘胶作用下铬原子束的空间分布

热原子束经原子炉炉口喷射出后具有一定的发散分布,即符合玻尔兹曼分布。该发散分布的原子束在进入 1 维光学粘胶后,由于受到 1 维光学粘胶的耗散力作用,其横向速率将会逐渐减小,从而使得原子在横向上原具有一定发散分布的原子束得到压缩,即由于 1 维光学粘胶的作用对热原子束进行了一定程度上的冷却,使得原子束的发散程度降低,形成了 1 维光学粘

胶作用之后的分布状态。

根据(2)式可知,1维光学粘胶对中性原子的作用力与激光场强度、激光场失谐量等因素有关,在不同特性参量作用下,原子束将会呈现出不同的横向分布。利用经典牛顿运动学理论,即:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F(v) \quad (3)$$

可通过4阶龙格-库塔数值积分算法求解出铬原子的运动轨迹,继而可以得到原子的横向分布。

图3中给出了不同激光冷却场强度下原子束的横向分布,从中可以看出,随着激光场强度的增加,原子横向所受的冷却作用力也将不断增加,原子的分布向中轴区域集中,且随着激光场强度的增加,该种集中的趋势逐渐变缓。这正是由于激光场强度的饱和效应所引起的,即随着激光强度的增加,激光场对原子的作用力会达到饱和,从而使得准直作用效果也会达到饱和,出现上述的分布特点。除了激光强度会影响到原子的分布之外,激光场的失谐量也会对原子的分布产生影响。当激光场为红失谐时,激光场作用力所体现出来的是对原子的冷却力,即耗散力,在该力的作用下原子的横向速率不断减小,从而导致原子束的发散角减小。而当激光场为蓝失谐时,激光场的作用所体现出来的却是一种类似加热作用,使得原子的分布变宽。

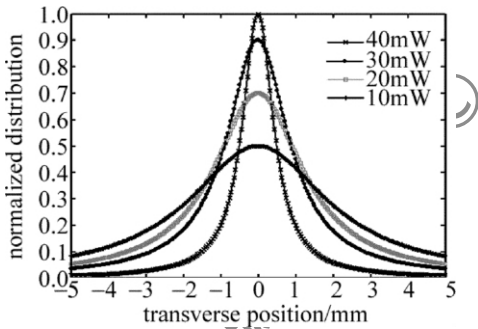


Fig. 3 Calculated spatial distribution at different laser power

图4中给出了不同激光失谐量下原子的横向分布,从中可以看出,在红失谐条件下原子的横向分布范围较窄,且当激光失谐量等于原子线宽的一半时,该分布最窄。当激光场为蓝失谐时候,由于加热机制的存在,

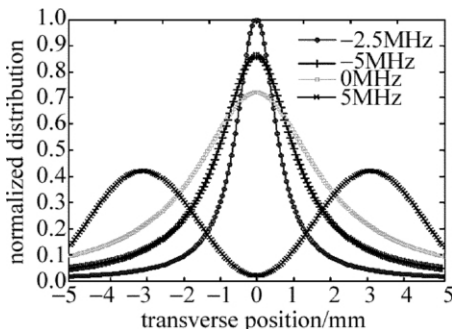


Fig. 4 Calculated spatial distribution at different laser detuning

在,使得铬原子的分布在原来的基础上进一步加宽。

图5中给出了不同激光失谐量条件下铬原子数分布的情况,于是可以得到以下两点结论:(1)对铬原子而言当激光失谐量为-2.5MHz时所获得的准直效果最好;(2)当激光失谐量为正失谐时,将会使得与其反向传输的铬原子获得加速效应,而非减速过程,因此,将会导致原子束的发散,而非压缩。

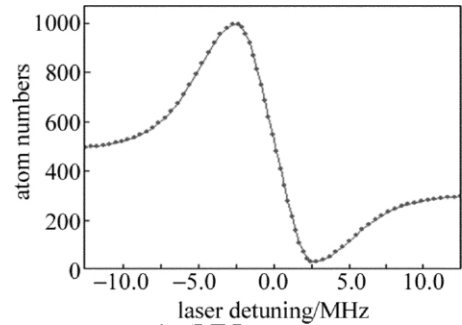


Fig. 5 Atom distribution at different laser detuning

图6中给出了不同激光场范围(宽度)条件下经过激光冷却场作用后原子束的分布状态。由图可见,随着激光冷却场范围的加宽,中性原子束的准直效果也将变好。当激光冷却场宽度为30mm时,原子束分布的半宽度约是激光冷却场宽度为6mm时的一半。这是因为当激光冷却场的宽度变宽后,穿越激光冷却场的中性原子将于激光冷却场相互作用的时间增加,从而使得激光冷却场耗散力作用于中性原子的时间变长,导致原子束的冷却效果越明显。

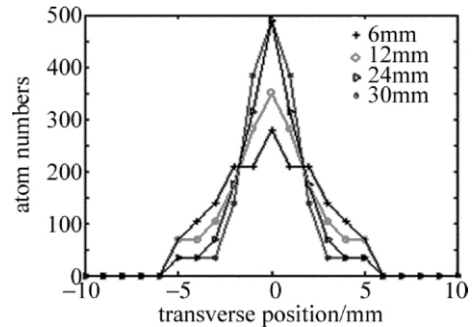


Fig. 6 Distribution of atoms vs. different laser field width

图7中给出了激光功率为40mW、失谐量为-2.5MHz条件下铬原子束经由1维光学粘胶作用后

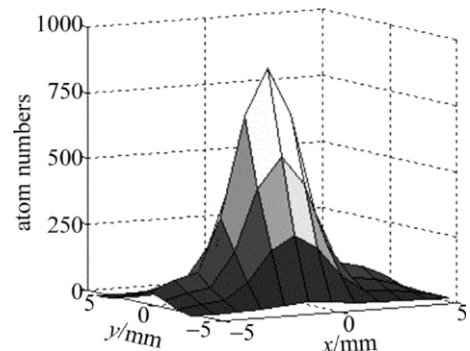


Fig. 7 3-D distribution of atoms

的3维空间分布。

图8中给出了激光功率为40mW、失谐量为-2.5MHz条件下铬原子束准直前后的分布。从图中可以得到,经过准直后铬原子束的半峰全宽被压缩为冷却前的0.43倍,而强度分布中心值也增大为准直前的1.79倍,该仿真结果与激光冷却场准直铬原子束实验结果吻合较好^[9]。

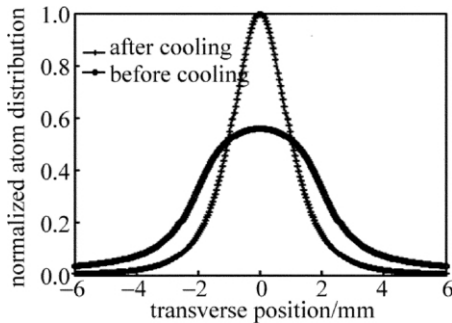


Fig. 8 Distribution of atoms before and after laser cooling

3 结论

详细分析了1维光学粘胶作用下中性铬原子所受耗散力的特性,利用4阶龙格-库塔数值积分算法对不同光学粘胶作用下中性铬原子的空间分布特征进行了仿真计算,给出了相应的仿真结果。结果表明,当激光功率为40mW、且失谐量为-2.5MHz时,铬原子束经

过1维光学粘胶作用后其空间分布的半峰全宽被压缩为作用前的0.43倍,而原子束密度分布中心值也增大为作用前的1.79倍。

参 考 文 献

- [1] McCELLAND J J, ANDERSON W R. Accuracy of nanoscale pitch standards fabricated by laser-focused atomic deposition [J]. National Institute of Standards and Technology, 2003, 108(2): 99-113.
- [2] ROGER W, GOWAN M C. Light force cooling, manipulation, and nanometer-scale deposition of neutral aluminum atoms [D]. Colorado State, USA: Colorado State University, 1996: 189-201.
- [3] LETT P D, PHILLIPS W D, ROLSTON S L. Optical molasses [J]. Journal of the Optical Society of America, 1989, B6(11): 2084-107.
- [4] TAN L. Study of dissipative force and laser cooling of a moving atoms [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2003: 59-62 (in Chinese).
- [5] LU X D, LI T B, MA Y, *et al.* Investigation of atom-optical properties of laser focused Cr atomic deposition [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(12): 8205-8207 (in Chinese).
- [6] ZHANG W T, ZHU B H. Laser collimation of a chromium beam using doppler force [J]. Chinese Journal of Physics, 2008, 46(1): 63-72.
- [7] ZHANG W T, ZHU B H, XIONG X M. Analysis of nanometer structure for chromium atoms in Gauss standing laser wave [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(12): 123202/1-423202/3.
- [8] ZHANG B W, ZHANG W T, MA Y, *et al.* Collimation of chromium beam by one-dimensional Doppler laser with large collimating slit [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5485-5490 (in Chinese).
- [9] ZHANG W T, ZHU B H, XIONG X M, *et al.* A laser-cooled chromium atomic beam under 1mrad for direct-write atom-lithography [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics, 2008, B266(2): 5171-5174.