

原子纳米光刻中双层光学掩膜的实现方法研究

陈 晟, 马 艳, 张萍萍, 王建波, 邓 晓, 肖盛炜, 马 蕊, 李同保

(同济大学 物理系, 上海 200092)

摘 要: 利用原子光刻的方法制备纳米结构的光栅已经成为了一种较为成熟的工艺。通过原子与激光驻波场的相互作用, 利用原子自生在势能场中的偶极力对原子的密度进行调制, 从而得到所需要的光栅结构。利用此种工艺所制备的光栅相对于传统工艺来说具有精度高, 光栅常数直接溯源于原子能级。希望能够通过对激光的改良来提升原子沉积结果。通过双层驻波场来提高原子沉积质量已经被多次提到。实验中利用几何光学的方法实现了所需要的新型激光驻波场。并对其汇聚, 相干等特性进行了研究, 取得了较为满意的结果。为利用双层驻波场来沉积原子打下了基础。

关键词: 原子光刻; 光学掩膜; 异形光束; 几何光学

中图分类号: TN405 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2070-04

Production of double-layer light mask in atom nano-lithography

Chen Sheng, Ma Yan, Zhang Pingping, Wang Jianbo, Deng Xiao, Xiao Shengwei, Ma Rui, Li Tongbao

(Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking advantage of atom lithography to produce the nano level grating has become a mature process technology in nano fabrication. When the atoms pass through a standing wave field, using the dipole force on the atoms is a new technology to build the nanostructures. The grating obtained by this method has its special characteristic. Its period is directly related to the wavelength of laser and this can be reviewed to the transition frequency of the atom. It is hoped to use a new kind of light mask to improve the deposition quality. Using double-layer light mask have been mentioned for several times. In the experiment, geometrical optics were used to achieve what we need. A prism was designed to generate this special beam. From the experiment result, the beam is well generated. This kind of beam can be easily used in the subsequent experiment.

Key words: atom lithography; light mask; special-shaped beam; geometrical optics

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(10804084, 91123022); 上海纳米专项(0852nm07000, 0952nm07000);

国家科技支撑计划(2006BAF06B08); 国家教育部博士点基金(200802471008)

作者简介: 陈晟(1989-), 男, 硕士生, 主要从事原子光刻方面的研究。Email: shptcyys@hotmail.com

导师简介: 李同保(1942-), 男, 院士, 主要从事纳米计量标准方面的研究。Email: tbli@tongji.edu.cn

0 引言

现代电子科技中,纳米制造^[1]已经成为一项至关重要的技术^[2]。通过激光汇聚中性原子用来制备纳米光栅结构^[3-7]是一种新型的纳米结构制备方法^[8]。利用中性原子在光场中收到的辐射力来控制原子的运动^[9],形成周期性纳米光栅条纹。用此方法制备出来的光栅条纹,周期直接溯源于激光波长,为纳米计量及标准传递提供更加精确的手段^[10]。1993年 McClelland^[11]等人利用 Cr 原子沉积制作了周期为 212 nm 的纳米结构,最近对于原子在非传统高斯光束驻波场中的汇聚特性也进行了讨论和研究^[11]。2005年,R.Arun^[12]等人提出了使用双层激光驻波场对原子光刻进行优化改进,从而可以得到更高质量的光栅结构。

文中主要研究了双层激光驻波场的实现方法,并通过实验获得了较为满意的高质量双层光学掩膜。从而为进一步的实验提供了一定的基础研究工作。

1 双层光学掩膜

利用光学掩膜方法制备原子光栅,就是指将一束激光正射入一面反射镜,使激光沿原路返回。由于激光优秀的相干性,会在原路返回的过程中形成激光驻波场。当原子束通过驻波场时会由于激光对原子偶极力的作用是原子数的密度分布会发生变化,原子会聚集至驻波场的波节或波腹处(视光束的失谐量而定)。接着将经过密度调制的原子数沉积到基板上就可以得到纳米级的光栅条纹。为了提高所沉积的纳米光栅的质量,即提高其半高宽与对比度。就提出利用双层光学掩膜方法来实现。

所谓双层光学掩膜,简单来说就是在原子沉积到基片之前,先后经过几层激光驻波场,从而使原子经过多次汇聚来获得更为优良的沉积结果,起到了类似于双层透镜组合消除像差的效果。为了应用到原子光刻中,双层光学掩膜中必须保证双层的光束相位必须一致。要实现这样的双层光束较为困难。

需要的光场可以表达为:

$$U(x,y)=G_0\left(\frac{x}{w_0}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right) \quad (1)$$

式中: G_0 为光强常数; w_0 为激光束腰半径; n 取值不同时,双层光束之间的距离会发生变化, n 越大,光

束的距离越远。当取 $n=2, G_0=1, w_0=120 \mu\text{m}$, 得到光场的分布。

图 1 表示希望得到的光场的大致形貌特征。为了实现此种双层光束,可以通过几何光学方法。利用光的折射原理,来设计一种可以实现目标的棱镜。

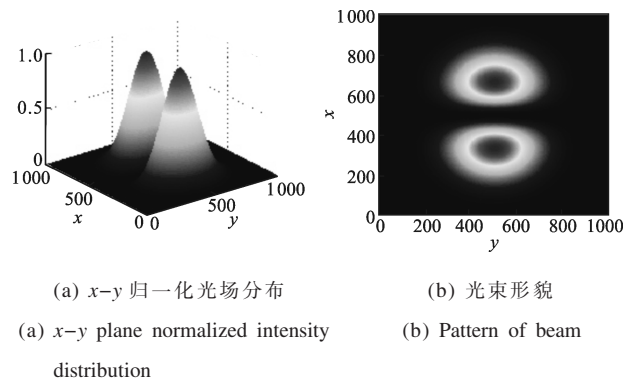


图 1 双层光学掩膜光场

Fig.1 Intensity distribution of the double-layer light mask

2 实现方法

为了实现所需相位相同的双层光学掩膜,可以考虑将一束传统高斯光束分离成两束光束,通过用棱镜将高斯光束劈开,就得到了所需的双层光学掩膜。笔者考虑利用一个的棱镜来实现。在棱镜设计之初,笔者使用光学设计设计辅助软件 Zemax,来对棱镜的光路进行模拟。

图 2 为利用 Zemax 软件模拟高斯光束经过棱镜后的光路图。由模拟结果可以清楚看出经过一块棱镜之后,高斯光束可以被分离,形成所需的两束激光形成双层光学掩膜。之后从模拟过程出发进行了棱镜设计。

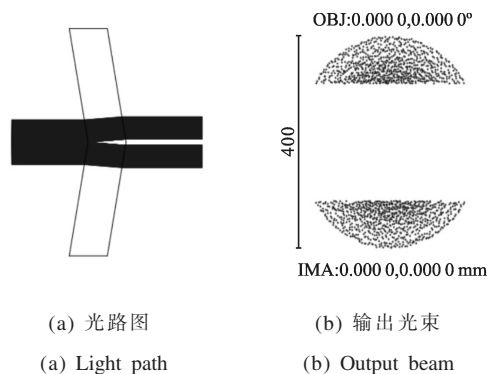
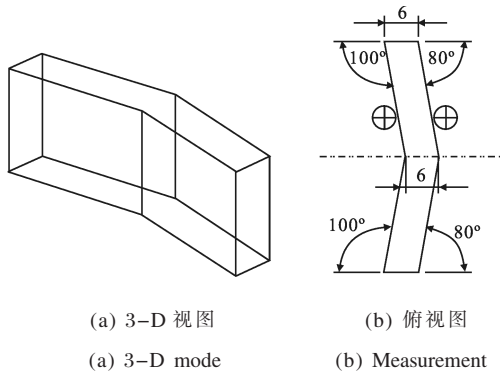


图 2 Zemax 模拟棱镜光路

Fig.2 Optical path simulated by Zemax

如图 3 所示,笔者设计这样一个分光棱镜,选择

石英来加工棱镜，因为石英对于光束的吸收系数较低，在前后表面都镀上针对 420 nm 的 10° 的高透膜，(因为棱镜前后表面与法线 n 向都有 10° 的夹角，所以镀膜时考虑镀上 10° 高透膜而不是 0° 高透膜)这就可以保证高斯光束在经过棱镜之后不会有太大的损耗，以保证在后续工作中有足够光强和功率来进行试验。在加工棱镜时，较为关键的地方就是保证几个角度的精确度。随着机械加工技术的发展，在棱镜加工时角度的精确度已经能够达到所需精度。



(a) 3-D 视图 (b) 俯视图
(a) 3-D mode (b) Measurement

图 3 设计的分光棱镜及尺寸
Fig.3 Prism and its size by design

3 实验结果

通过使用上述设计好的棱镜，笔者可以在实验上实现双层光学掩膜。在实验中，笔者采用波长为 532 nm 功率为 15 mW 的半导体激光器作为光源。使用一般的 CCD 作为接收装置，采集出射端的光强分布图样。

实验步骤如图 4 所示，笔者将一束激光正面射入自制的分光棱镜，对出射光束形貌进行研究分析。然后在棱镜与 CCD 之间加上一个焦距为 5 cm 的透镜，研究出射光束经过透镜后的成像特性。CCD 捕捉到的图像如图 5 所示。

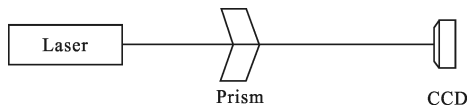
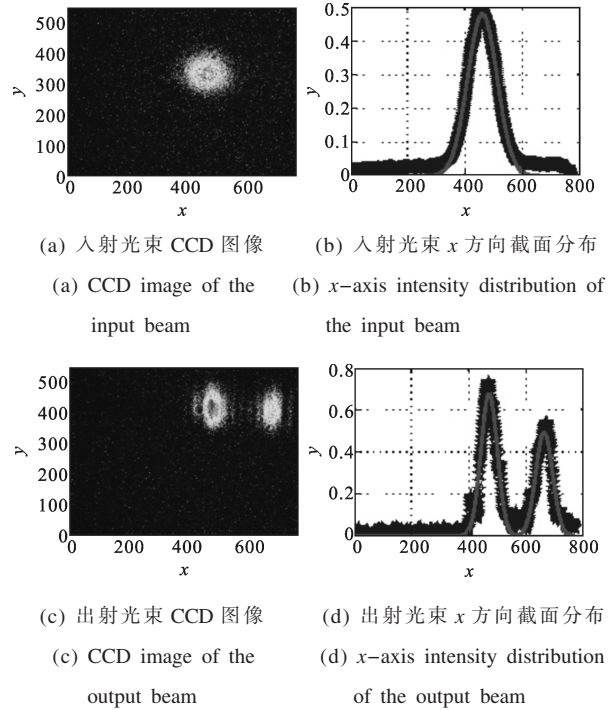


图 4 实验步骤图
Fig.4 Experimental scheme

从图 5 可以看出，当一束高斯光束正入射到棱镜之后，从棱镜的后表面输出得到的光束与理论模拟的光束相比较为符合。高斯光束被较为完美的分

开成两束相互独立的光束。通过计算机拟合，将原始数据进行高斯拟合，(图 5(b)、(d)中的实线为拟合曲线)，可以明显发现输出的光束对高斯函数的符合度较高，与理论值较为接近。这样，可以认为，所得到的双层光学掩膜仍然具有较为良好的光学特性。



(a) 入射光束 CCD 图像 (b) 入射光束 x 方向截面分布
(a) CCD image of the input beam (b) x -axis intensity distribution of the input beam
(c) 出射光束 CCD 图像 (d) 出射光束 x 方向截面分布
(c) CCD image of the output beam (d) x -axis intensity distribution of the output beam

图 5 CCD 图像

Fig.5 CCD images

接下来笔者对输出光场的传输特性进行研究，在棱镜与 CCD 之间放置一个焦距为 5 cm 的透镜，将光束进行汇聚，观察其在焦点之后的传输特性。

出射光束经过透镜之后在焦点以后的不同距离处光场分布图样，已经通过 CCD 进行捕捉和分析。如图 6 所示，同样，将所得到的原始数据进行高斯拟合(图 6(b)、(d)、(f)中的实线为高斯型拟合曲线)。笔者同样发现，光束经过透镜之后，光强分布也仍然与高斯函数拟合度较高。并且所得到的光束经过透镜之后在焦点附近呈现较好的汇聚特性，光斑大小会被缩小到一个很小的尺寸，由于所得光束经过一个透镜之后是一束发散的光束，随着距离的变大，而逐渐发散，光斑尺寸和两束激光之间的距离也变得越来越大，由此可见，笔者可以通过透镜组合搭建一个简单的望远镜系统来调节输出光束的光斑尺寸和激光之间的间距，同时保证光束比较好的光学特性。这样，笔者就可以根据后续的实验要求，通过调节光束的参数，形成所需

的双层激光掩膜,对原子进行汇聚。

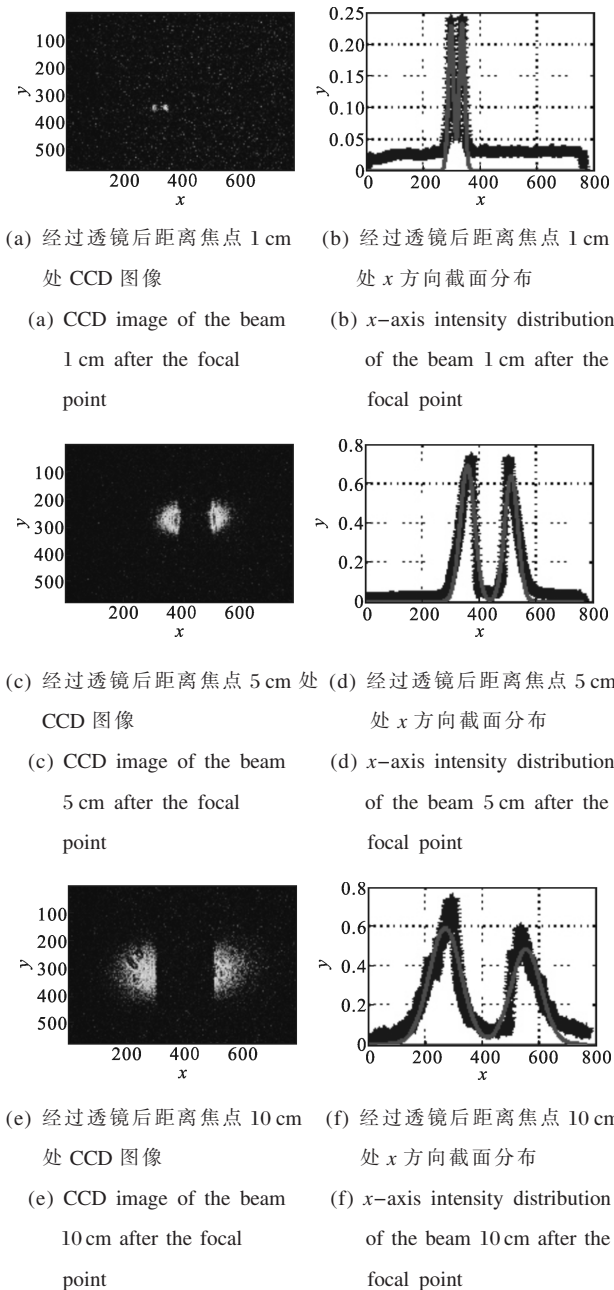


图 6 出射光束经过焦距为 5 cm 的透镜后的 CCD 图像

Fig.6 CCD pictures when the output beam passes through a lens (focal length is 5 cm)

4 结 论

在基于双层光学掩膜提高原子光刻沉积质量的理论基础上,笔者提出了一种新的想法来构造一种双层的光学掩膜,并且通过几何光学方法,利用棱镜的分光来实现这样的特殊光场。在实验结果里可以看出,利用棱镜得到了一个十分优良的双层光场,并

且通过透镜可以十分轻松地调节光束的形貌特征,因此,笔者可以将这样的双层光束应用到后续的有关原子光刻以及相关领域的实验中。

参 考 文 献 :

- [1] McClelland J J, Scholten R E, Palm E C, et al. Laser-focused atomic deposition [J]. *Science*, 1993, 262 (5135): 877-880.
- [2] McClelland J J. Atom-optical properties of a standing-wave light field[J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, 12(10): 1761-1768.
- [3] Deng X, Ma Y, Zhang P P, et al. Investigation of shadow effect in laser-focused atomic deposition[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 261: 464-469.
- [4] Mlynek J, Drodofsky U, Stuhler J, et al. Atom lithography [J]. *Annales De Physique*, 1998, 23(1): 57-64.
- [5] Timp G, Behringer R E, Tennant D M, et al. Using light as a lens for submicron, neutral-atom lithography [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 69(11): 1636-1639.
- [6] Sligte E T, Smeets B, K M R van der Stam, et al. Atom lithography of Fe[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(19): 4493-4495.
- [7] Zheng Chunlan, Li Tongbao, Ma Yan, et al. Analysis of Cr atom trajectory and focusing deposition in the standing wave field[J]. *Acta Phys Sin*, 2006, 55(9): 4528-4534. (in Chinese) 郑春兰, 李同保, 马艳, 等. 激光驻波场中 Cr 原子运动轨迹与汇聚沉积的分析[J]. *物理学报*, 2006, 55(9): 4528-4534.
- [8] Drodofsky U, Drewsen M, Pfau T, et al. Atom lithography using light forces[J]. *Microelectronic Engineering*, 1996, 30 (1-4): 383-386.
- [9] McClelland J J, Gupta R, Jabbour Z J, et al. Laser focusing of atoms for nanostructure fabrication[J]. *Australian Journal of Physics*, 1996, 49(2): 555-565.
- [10] Ma Y, Li T B, Wu W, et al. Laser-focused atomic deposition for nanascale grating [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(7): 073202.
- [11] Zhang Wengtao, Zhu Baohua, Huang Jing, et al. Chromium atom deposition in elliptical standing wave field [J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(10): 215-219. (in Chinese) 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): 215-219.
- [12] Arun R, Averbukh I S, Pfau T. Atom nanolithography with multilayer light masks: particle optics analysis [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(2): 1-7.