

# 基于直边衍射高斯激光驻波光学势阱仿真\*

张宝武<sup>1)†</sup> 支理想<sup>1)</sup> 张文涛<sup>2)</sup>

1) (中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

2) (桂林电子科技大学电子工程学院, 桂林 541004)

(2012年5月7日收到; 2012年7月5日收到修改稿)

为了研究基片边缘对激光汇聚原子光学势阱的影响, 基于标量光学理论, 采用数值计算对基片衍射与否两种情况下, 高斯激光驻波场光学势阱进行了仿真, 通过三维和截面仿真图充分显示了两种情况下高斯激光光学势阱的不同. 详细研究了激光中轴线与基片表面距离、激光束腰和反射镜之间的距离对光学势阱的影响.

**关键词:** 直边衍射, 高斯激光, 光学势阱

**PACS:** 32.80.Pj, 42.50.Vk

## 1 引言

基于激光冷却和捕获的原子光学近几年发展非常迅速, 其中的一个研究领域就是通过激光驻波场精确控制原子运动, 实现纳米图像的制作<sup>[1-12]</sup>. 由于这种激光驻波场对其中的原子具有汇聚作用, 和传统物质透镜汇聚光波现象非常类似, 研究者将这个领域中的驻波场形象地比作原子透镜. 这种技术制备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>[2,3]</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结构, 一般要求入射激光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表面传播. 由于基片边缘的作用, 入射激光束的一部分通常会被挡掉. 然后, 这个被阻挡的激光束沿着基片表面传播, 遇到反射镜后原路返回, 和原来的入射激光叠加, 形成汇聚原子的光波场. 考虑到基片厚度和激光束截面直径尺寸上的悬殊差别, 即基片在垂直光轴方向上的厚度约为 2 mm, 在中轴线平行的平面内延伸程度都为厘米量级, 而入射激光束的截面直径不超过 0.1 mm, 这样, 基片

边缘和入射激光之间构成了直边衍射的物理情形, 基片沉积表面上传播的驻波场就会受到衍射效应的影响, 原子在通过汇聚驻波光场的时候就会呈现出不同于非衍射情况下的运动状态, 进而纳米光栅的沉积精度也会受到影响. 因此, 探讨激光驻波场势阱中衍射效应的影响对激光汇聚原子实验来说具有非常重要的意义.

本文运用标量光学衍射理论, 获得了高斯激光直边衍射光场分布表达式, 通过数值计算对比研究了基片衍射与否两种情况下光学势阱的不同. 其中首先通过三维视图展示了两者的差别, 然后基于铬原子 (<sup>52</sup>Cr) 相关参数, 研究了激光中轴线与基片沉积表面距离, 激光束腰和反射镜之间的距离对光学势阱的影响.

## 2 理论分析

图 1 给出了实验中汇聚激光束, 基片和反射镜之间的相互位置关系. 其中准直原子束沿着  $z$  轴方向传播, 汇聚激光束沿着  $x$  轴传播,  $b$  表示激光中轴线和基片沉积表面之间的距离,  $x_w$  表示激光束腰和反射镜之间的距离.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10972210 和 11064002)、浙江省钱江人才计划 (批准号: 2011R10094) 和广西自然科学基金 (批准号: 2012gxnsfaa53229) 资助的课题.

† E-mail: zhangbaowu1978@gmail.com

基于图 1 抽象出来的高斯激光衍射原理如图 2 所示, 其中  $K$  是对应于基片边缘的直边衍射屏 (坐标为  $y_1 C z_1$ ,  $z_1 < 0$  的空间为透光孔  $\Sigma$ , 基片沉积表面在  $y_1 C x$  平面内,  $F$  是反射镜的镜面,  $E$  是反射镜的镜面之前垂直于激光中轴线的某一个考察屏 (坐标为  $y P_0 z$ ).  $K, F$  和  $E$  三个平面相互平行且垂直于  $x$  轴.

由基尔霍夫近似标量衍射理论可知, 入射激光在传播距离为  $x_1$  的考察屏上的  $P$  点复振幅为 [13]

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

式中  $i$  是虚数单位;  $k = 2\pi/\lambda$  是光波波数, 其中,  $\lambda$  是光波波长; 积分区域覆盖透光孔  $\Sigma: y_1 \in [-\infty, \infty]; z_1 \in [-\infty, 0]$ . 整个系统的  $x$  轴原点设

置在反射镜的中心  $O$  点处, 则透光区上任意一点  $Q$  的坐标可记为  $(x_0, y_1, z_1)$ ,  $Q$  点通过反射镜的镜像坐标可以记为  $(-x_0, y_1, z_1)$ . 设观察平面上  $P$  点的坐标为  $(x, y, z)$ , 则它和  $Q$  点的垂直距离为  $x_1 = x - x_0$ , 它和  $Q$  点的垂直距离为  $x_2 = x + x_0$ .

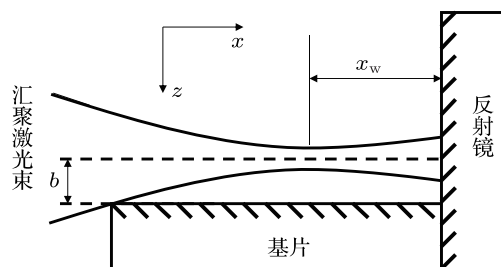


图 1 激光束, 基片和反射镜之间的位置关系

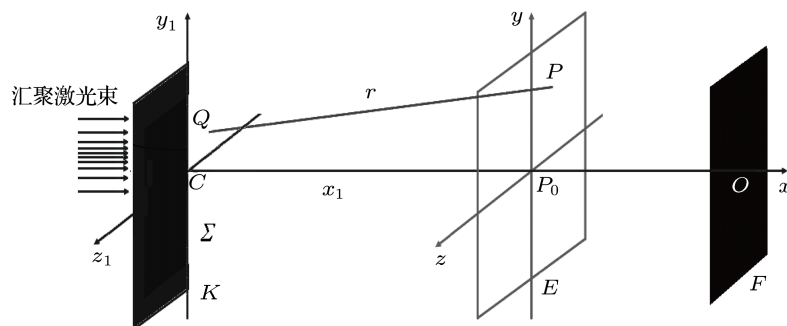


图 2 激光直边衍射原理

对于入射高斯激光来说, 它在透光区  $\Sigma$  中的任一点  $Q$  的复振幅表示为

$$\begin{aligned} & \tilde{E}_1(x_1, y_1) \\ &= \frac{E_0}{w(x)} \exp\left[-\frac{(z_1 - b)^2 + y_1^2}{w^2(x)}\right] \\ & \times \exp\left[ik\left(x + \frac{(z_1 - b)^2 + y_1^2}{2R(x)}\right)\right], \quad (2) \end{aligned}$$

式中,  $E_0$  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.

将 (2) 式代入 (1) 式, 并考虑到 (2) 式中光复振幅在  $y$  和  $z$  方向上的独立性, (1) 式可以分解为两

个独立积分的乘积, 即

$$\tilde{E}_1(P) = \frac{\exp(ikx_1)}{i\lambda x_1} \tilde{E}_{1y} \tilde{E}_{1z}, \quad (3)$$

(3) 式所示的衍射行波场遇到反射镜时, 会被原路反射, 形成反射波. 反射波可以简单地看成入射波通过反射镜的镜像加上半波损失产生, 如 (4) 式所示:

$$\tilde{E}_2(P) = \frac{\exp(-ikx_2 + i\pi)}{i\lambda x_2} \tilde{E}_{2y} \tilde{E}_{2z}. \quad (4)$$

(3) 和 (4) 两个式子表示的波相遇叠加后就会形成驻波场, 其光强表达式为

$$I(P) = [\tilde{E}_1(P) + \tilde{E}_2(P)][\tilde{E}_1(P) + \tilde{E}_2(P)]^*. \quad (5)$$

将 (5) 式代入到汇聚原子的光势阱表达式 [3](6) 中, 我们就可以研究衍射情况下各个参数对激光驻波

势阱的影响.

$$U(P) = \frac{\hbar\Delta}{2} \ln \left[ 1 + \frac{I}{I_s} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4\Delta^2} \right], \quad (6)$$

其中,  $\hbar$  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.

### 3 仿真结果和讨论

基于前面的理论分析, 我们对 (6) 式进行了数值仿真, 研究了衍射时各个参数对光学势阱的影响. 与  $^{52}\text{Cr}$  原子相关的参数有对应于共振跃迁  $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$  的激光, 波长  $\lambda = 425.55 \text{ nm}$ , 跃迁谱线的自然线宽为  $\Gamma = 2\pi \cdot 5 \text{ MHz}$ , 饱和光强为  $I_s = 85 \text{ W/m}^2$ , 激光失谐量为  $\Delta = 2\pi \cdot 250 \text{ MHz}$ . 另外, 激光束束腰  $w_0 = 0.1 \text{ mm}$ , 入射激光功率  $P_0 = 3.93 \text{ mW}$ .

为了考察衍射效应影响, 我们首先仿真了束腰和曲率半径都不随  $x$  变化情况下基片衍射时准直高斯激光驻波光学势阱的三维分布, 如图 3(a) 所示, 其中  $x_0 = -5 \text{ mm}$ ,  $x_w = 0$ ,  $b = 0$ , 光轴方向仿真范围为  $[-\lambda, 0]$ , 垂直光轴方向仿真范围为  $[-0.4, 0.1] \text{ mm}$ . 为了对比, 我们在图 3(b) 中同时给出了非衍射情况下准直高斯激光驻波光学势阱分布.

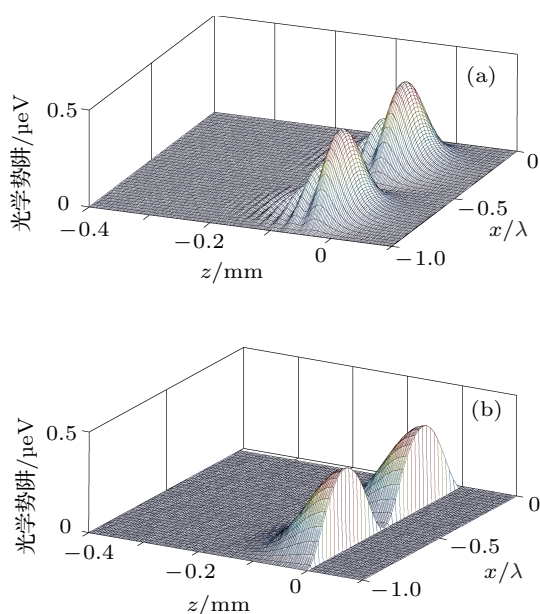


图3 准直高斯激光驻波势阱三维结构 (a) 衍射; (b) 非衍射

对比图 3 中衍射与否两种情况下准直高斯

激光驻波势阱结构, 我们可以看出衍射效应的存在与否: 1) 不影响高斯激光在轴向上 (沿  $x$  轴) 形成驻波式的光学势阱; 2) 不影响它在垂轴方向上 (沿  $z$  轴) 分布轮廓形式, 即仍然保持高斯形状. 不过直边衍射效应会造成如下影响: 第一, 光学势阱在垂轴方向上 (沿  $z$  轴) 的分布形成强烈的振荡; 第二, 光学势阱能够进入直边的几何阴影区, 即  $z > 0$  区域.

从前面的理论分析可知, 图 3 中光学势阱在垂轴平面和沿轴平面内的分布会随着参数  $b$  和束腰位置  $x_w$  的不同而不同. 为此, 我们首先考察了参数  $b$  的不同对光学势阱的影响, 其中参数  $x_w$  取零. 因为参数  $b$  表示了能够进入图 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随  $z$  的分布, 如图 4(a) 所示, 其中的仿真截面为  $x = -0.25\lambda$  的垂轴截面. 为了对比, 其中还给出了同种情况下, 非衍射时光学势阱随  $z$  变化分布的仿真结果. 当  $b = -2w_0$  时, 即入射激光完全进入透光区  $\Sigma$  内, 此时, 基片不会阻挡入射激光, 也就不存在衍射效应, 光学势阱在垂轴方向上的分布与非衍射情况下的分布完全重合; 当  $b = -w_0$  时, 即入射激光截面绝大部分进入透光区  $\Sigma$  内, 基片只把一个边缘的尾部阻挡掉, 此时, 在垂轴方向上相对于非衍射情况下的分布来说, 光学势阱存在一定的衍射效应, 衍射最大值为  $0.416 \mu\text{eV}$ ; 当  $b = 0$  时, 即入射激光的一半被基片阻挡, 一半进入透光区  $\Sigma$  内, 此时, 在垂轴方向上相对于非衍射情况下的分布来说, 光学势阱存在非常明显的衍射效应, 衍射最大值为  $0.422 \mu\text{eV}$ ; 当  $b = w_0$  时, 入射激光绝大部分截面被基片阻挡, 只有边缘的尾部进入透光区  $\Sigma$  内, 此时, 衍射与否两种情况下光学势阱的大小都明显地减小, 在垂轴方向上相对于非衍射情况下的分布来说, 光学势阱存在一定的衍射效应, 衍射最大值为  $0.032 \mu\text{eV}$ ; 当  $b = 2w_0$  时, 入射激光截面完全被基片阻挡, 此时, 衍射与否两种情况下光学势阱的大小都为零. 图 4(a) 还非常清楚地显示出, 和非衍射情况下相比, 当存在衍射时, 光学势阱除了在垂轴方向上呈现一定的强度振荡之外, 还明显地进入到了直边的几何阴影区之内, 即  $z > 0$ .

图 4(a) 清晰地显示出  $b$  的不同, 其衍射得到的光学势阱最大值不同. 因此, 我们取各衍射最大值所在的截面, 考察了参数  $b$  对沿轴截面内势阱的影响, 如图 4(b) 所示. 从图 4(b) 我们可以看出, 参数  $b$

的变化不影响光学势阱在沿轴方向上形成驻波形式, 它会改变波腹位置处的最大值. 当入射激光一半被阻挡掉时, 衍射得到的势阱最大值比其他任何情况下的都大.

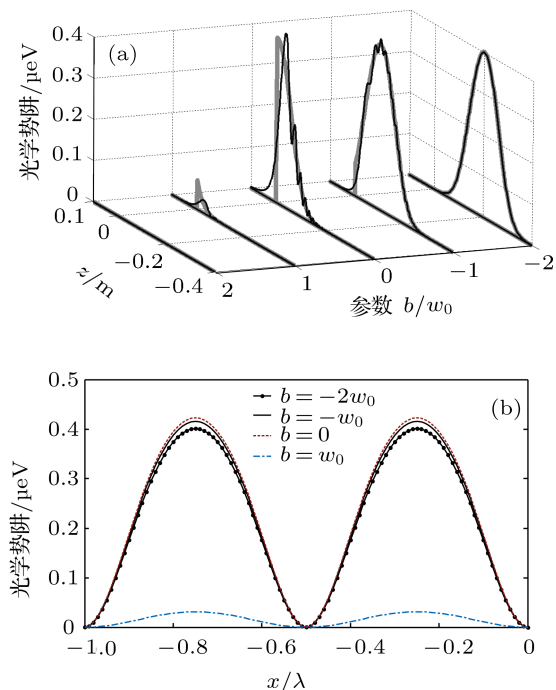


图4 不同参数  $b$  情况下光学势阱在垂轴方向 (a) 和沿轴方向 (b) 上的变化

图5给出不同参数  $x_w$  情况下光学势阱在垂轴方向和沿轴方向上分布的仿真结果, 其中参数  $b$  取零, 即入射激光一半被阻挡掉的位置, 两个方向的截面过点  $(x, z) = (-0.25\lambda, -0.036 \text{ mm})$ . 图5(a)和(b)显示, 不管是垂轴方向还是沿轴方向, 光学势阱随着位置的变化趋势不随参数  $x_w$  的变化而变化, 而经衍射作用的最大值会有较大的变化. 为此, 我们将这个最大值作为考察对象, 研究了它在点  $(x, z) = (-0.25\lambda, -0.036 \text{ mm})$  位置处随参数  $x_w$  的变化情况, 如图5(c)所示, 其中同时给出了非衍射情况下光学势阱最大值(点  $(x, z) = (0.25\lambda, 0 \text{ mm})$ ) 位置处随参数  $x_w$  的变化情况. 从图5(c)可以看出直边衍射后光学势阱最大值和非衍射情况下最大值随参数  $x_w$  的变化都呈现类似高斯形状分布, 整个变化曲线都相对于零点非常对称. 在每一个  $x_w$  位置处, 衍射情况下光学势阱最大值都比非衍射情况下的大. 在两种情况下光学势阱  $x_w \in [-5, 5] \text{ mm}$  范围内的大小变化量为  $0.002 \mu\text{eV}$ , 也就是说基本上没有变化.

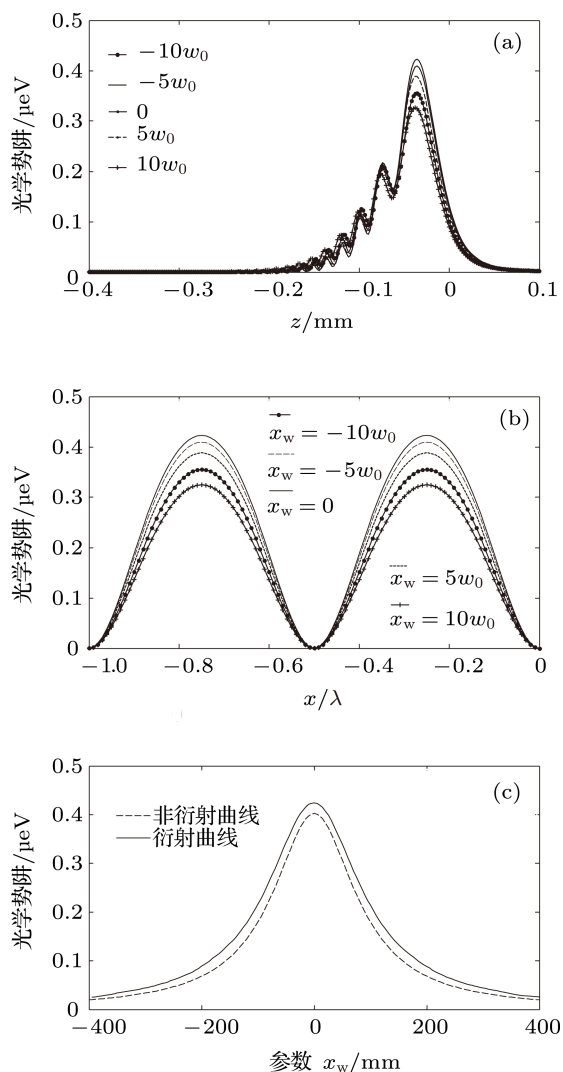


图5 不同参数  $x_w$  情况下光学势阱在垂轴方向和沿轴方向上分布的仿真结果

## 4 结论

本文基于  $^{52}\text{Cr}$  原子相关参数, 利用数值计算对高斯激光驻波场光学势阱进行了仿真, 通过三维和截面视图充分显示了衍射与否两种情况下高斯激光驻波场光学势阱的不同. 详细研究了激光中轴线与基片沉积表面距离、激光束腰和反射镜之间的距离对光学势阱的影响. 结果表明, 直边衍射不会影响高斯激光在轴线方向上形成驻波式的光学势阱, 不会影响垂轴方向上的高斯轮廓趋势, 但是会使光学势阱在垂轴方向上呈现一定大小的振荡, 并且能够进入到直边的几何阴影区之内. 激光中轴线与基片沉积表面距离会影响光学势阱在垂轴方向上的分布和衍射最大值; 激光束腰与反射镜之间的距离不会改变光学势阱在垂轴方向上的振荡趋势

和轴线方向上的驻波形式,但是会影响它的衍射最大值,不过这个最大值在  $[-5, 5]$  mm 范围内大小变化量仅为  $0.002 \mu\text{eV}$ ,也就是说基本上没有变化.

感谢同济大学张萍萍博士,马艳副教授和李同保教授,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.

- 
- [1] Cai W Q, Li C W, Huo Y S, Wang Y Z 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 611 (in Chinese) [蔡惟泉, 李传文, 霍芸生, 王育竹 1999 物理学报 **48** 611]
- [2] Li T B 2005 *Shanghai Measurement and Testing* **185** 8 (in Chinese) [李同保 2005 上海计量测试 **185** 8]
- [3] Anderson W R, Bradley C C, McClelland J J, Celotta R J 1999 *Phys. Rev. A* **59** 2476
- [4] Zhang W T, Zhu B H, Huang J, Xiong X M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 103203 (in Chinese) [张文涛, 朱保华, 黄静, 熊显名 2011 物理学报 **60** 103203]
- [5] Zhang W T, Zhu B H, Xiong X M, Huang J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 063202 (in Chinese) [张文涛, 朱保华, 熊显名, 黄静 2011 物理学报 **60** 063202]
- [6] Zhang W T, Zhu B H, Xiong X M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 033201 (in Chinese) [张文涛, 朱保华, 熊显名 2011 物理学报 **60** 033201]
- [7] Zhang P P, Ma Y, Zhang B W, Li T B 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 1114001 (in Chinese) [张萍萍, 马艳, 张宝武, 李同保 2011 光学学报 **31** 1114001]
- [8] Zhang P P, Ma Y, Li T B 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0514004 (in Chinese) [张萍萍, 马艳, 李同保 2011 光学学报 **31** 0514004]
- [9] Zhang B W, Ma Y, Zhao M, Zhang W T 2011 *Laser Technology* **35** 364 (in Chinese) [张宝武, 马艳, 赵敏, 张文涛 2011 激光技术 **35** 364]
- [10] Zhang W T, Zhu B H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5392 (in Chinese) [张文涛, 朱保华 2010 物理学报 **59** 5392]
- [11] Lu X D, Li T B, Ma Y, Wang L D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8205 (in Chinese) [卢向东, 李同保, 马艳, 汪黎栋 2009 物理学报 **58** 8205]
- [12] Ma Y, Li T B, Wu W, Xiao Y L, Zhang P P, Gong W G 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 073202
- [13] Yu D Y, Tan H Y 2011 *Engineering Optics* (3rd Ed.) (Beijing: China Machine Press) p378 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2011 工程光学 (第 3 版) (中国机械出版社) 第 378 页]

# Simulation of optical potential of Gaussian laser standing wave by diffraction of straight edge\*

Zhang Bao-Wu<sup>1)†</sup> Zhi Li-Xiang<sup>1)</sup> Zhang Wen-Tao<sup>2)</sup>

1) (College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

2) (College of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

(Received 7 May 2012; revised manuscript received 5 July 2012)

## Abstract

In order to study the effect of substrate on the focusing laser beam in atom lithograph, the simulations of optical potential of Gaussian laser standing wave in the presence and the absence of straight edge diffraction are performed based on the scalar optical theory. The similarities and differences in optical potential between the diffractive Gaussian and non-diffractive Gaussian laser beam are fully indicated by the three-dimensional and cross-sectional figure. The effects of the distance between laser axis and substrate, the distance between laser waist and reflective mirror are fully studied.

**Keywords:** diffraction by straight edge, Gaussian laser, optical potential

**PACS:** 32.80.Pj, 42.50.Vk

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10972210, 11064002), the Program for Qianjiang Talents in Zhejiang Province, China (Grant No. 2011R10094), and the Natural Science Foundation of Guangxi, China (Grant No. 2012gxnsfaa53229).

† E-mail: zhangbaowu1978@gmail.com