

释放孔对微机电系统变形镜光学性能的影响

蔡冬梅 逄培培 贾鹏 王东

(太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

摘要 利用表面工艺制作的微机电系统(MEMS)变形镜具有体积小、分辨率高、驱动电压低等优点,然而镜面存在大量的释放孔形成一个规则的阵列结构,影响了变形镜的光学性能。设计制作了一种基于表面工艺的 MEMS 变形镜单元,研究了释放孔阵列对变形镜光学性能的影响。从夫琅禾费衍射原理出发,建立了二维释放孔阵列的衍射理论模型。研究表明,随着释放孔尺寸的增加和相邻释放孔间距的降低,中央零级衍射光强降低,衍射效应增强;同时镜面的有效反射面降低,总反射率降低。释放孔结构影响哈特曼波前传感器对畸变波前的测量性能,使聚焦光斑能量降低,同时随着波前扰动的增强,相邻聚焦光斑发生串扰,波前测量精度降低。

关键词 表面光学;自适应光学;释放孔;微机电系统变形镜;衍射

中图分类号 TP211.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0612001

Effects of Etch Holes on Optical Properties of Micro Electro Mechanical System Deformable Mirror

Cai Dongmei Ti Peipei Jia Peng Wang Dong

(Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract Micro electro mechanical system (MEMS) deformable mirrors fabricated by surface technics have the advantages of small volume, high resolution and low driving voltage et al. . However a large number of etch holes on the mirror formed in a regular array structure affect the optical properties of the deformable mirror (DM). We design and manufacture MEMS DM cell based on surface technics, which can be used in the research of effects of etch holes on optical properties of DMs. From the Fraunhofer diffraction theory, diffraction patterns created by two-dimensional etch hole arrays on MEMS DMs have been investigated. Research result shows that when the dimensions of etch holes increase and adjacent spacings of etch holes decrease, the central zero-order diffracted light intensity decreases and the diffraction effect increases, leading to decreases of the effective reflection surface and reflectivity of DM surface. The etch hole structures affect measurement performance of Shark-Hartmann wavefront sensor on wavefront aberration. Because they can reduce the energy of focal spot and reduce the accuracy of wavefront measurement with the disturbance of wavefront enhanced and focused spot adjacent crosstalk.

Key words optics at surfaces; adaptive optics; etch holes; micro electro mechanical system deformable mirror; diffraction

OCIS codes 010.1080; 230.6120; 220.1080; 230.4685

1 引言

变形镜是自适应光学系统的核心器件,与传统光学元件不同,它通过驱动电压控制实现高速、高精度的光学镜面面形的变化,改变入射光波的相位分布,对波前畸变进行补偿,广泛用于激光光束校正、天文成像和视网膜成像等领域^[1]。随着自适应光学

技术应用范围的扩展,小体积、高分辨率、低成本变形镜是构成微小型自适应光学系统的关键。基于微机电系统(MEMS)技术的静电驱动变形镜以其体积小、能耗低、单元密度高、响应速度快以及与集成电路兼容性好等优点成为微小型变形镜的一个重要发展方向^[2-3]。采用表面工艺制作 MEMS 变形镜

收稿日期: 2013-12-05; **收到修改稿日期**: 2013-12-23

基金项目: 山西省自然科学基金(2013011006-4)、微细加工光学国家重点实验室开放基金(KFS4)、中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF201301)

作者简介: 蔡冬梅(1974—),女,博士,副教授,主要从事自适应光学、微小波前校正器等方面的研究。

E-mail: dm_cai@163.com

主要包括基底选择、薄膜沉积、光刻、刻蚀和湿法腐蚀等步骤。湿法腐蚀将器件浸入一定质量分数的 HF 溶液中,将牺牲层腐蚀掉,进行结构的释放形成变形镜面和基底电极之间的空腔结构,同时在 MEMS 变形镜的表面形成一个释放孔阵列,释放孔便于 HF 溶液进入牺牲层进行湿法腐蚀^[4]。由于 MEMS 加工工艺的特点,表面工艺加工出来的 MEMS 器件表面不可避免会出现大量释放孔。释放孔的尺寸和相邻孔间距不仅直接影响牺牲层能否成功释放,而且会影响周围流体对器件产生的压膜效应及由此引起的器件机械特性的变化^[5]。更重要的是,作为自适应光学系统的光学校正元件, MEMS 变形镜必需具有良好的光学性能,释放孔会对器件的光学性能产生重要的影响。

本文讨论表面工艺制作的 MEMS 变形镜镜面的释放孔对变形镜的光学性能的影响。分析了释放孔结构造成的表面反射率、衍射效应,以及对哈特曼波前传感器波前测量性能的影响。

2 基于三层多晶硅表面工艺的 MEMS 变形镜

目前,世界上有多家公司利用表面工艺制作 MEMS 器件,由于不同应用领域 MEMS 器件的结构存在很大的差异,各家公司的工艺流程和规范都存在较大差异。MEMScap 公司开发的三层多晶硅表面工艺 (PolyMUMPs) 为全球用户提供代工服务。基于 PolyMUMPs 表面多晶硅工艺,设计加工了多种驱动结构的 MEMS 变形镜,图 1 为其中一种 L 型弹簧驱动结构的 MEMS 变形镜单元的扫描电镜 (SEM) 照片。单元镜面大小为 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$,镜面厚度为 $2\ \mu\text{m}$,表面镀金膜提高镜面反射率,表面释放孔阵列数为 12×12 ,释放孔尺寸为 $8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$,相邻孔间距为 $30\ \mu\text{m}$ 。

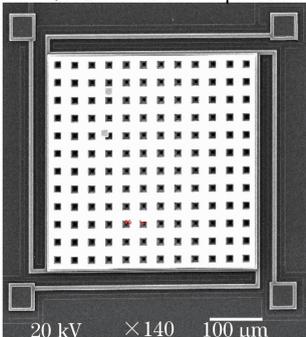


图 1 MEMS 镜面单元 SEM 照片

Fig. 1 SEM image of MEMS mirror unit

一平面光波以一定角度 θ 入射至两个均匀介质的分界面发生反射,介质表面光的反射率可以通过光的电磁理论进行分析。将入射光和反射光的电磁振动矢量分成两个分量,一个平行于入射面,另一个垂直于入射面,分别用 p 和 s 来表示,分别得到 p 和 s 分量的反射率为^[6]

$$R_p = \frac{\left| \sqrt{\frac{u_1}{\epsilon_1}} \cos \theta - \sqrt{\frac{u_2}{\epsilon_2}} \sqrt{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sin^2 \theta} \right|^2}{\left| \sqrt{\frac{u_1}{\epsilon_1}} \cos \theta + \sqrt{\frac{u_2}{\epsilon_2}} \sqrt{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sin^2 \theta} \right|^2},$$

$$R_s = \frac{\left| \sqrt{\frac{u_2}{\epsilon_2}} \cos \theta - \sqrt{\frac{u_1}{\epsilon_1}} \sqrt{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sin^2 \theta} \right|^2}{\left| \sqrt{\frac{u_2}{\epsilon_2}} \cos \theta + \sqrt{\frac{u_1}{\epsilon_1}} \sqrt{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sin^2 \theta} \right|^2}, \quad (1)$$

式中 u_1 和 u_2 为两种介质的磁导率,二者近似相等, ϵ_1 和 ϵ_2 为两种介质的介电常数, θ 为入射光与界面法线的夹角。总反射率 $R = R_p \cos^2 \alpha + R_s \sin^2 \alpha$, 其中 α 为入射光波电磁振动矢量与入射面的夹角。MEMS 镜面的反射率由入射光的偏振态、入射角和材料的介电常数确定。(1)式确定了镀金膜镜面的理论反射率,由于工艺水平限制,实际反射率小于理论值。除此之外,释放孔本身不能对入射光进行反射,实际的反射镜面积减小,入射光能量损失,损失的能量正比于释放孔面积与镜面的总面积之比。图 1 中 MEMS 变形镜单元的释放孔总面积为 $9216\ \mu\text{m}^2$, 占镜面总面积的 5.76% , 至少有 5.76% 的入射光能量不能被变形镜面反射,在不考虑其他反射损耗条件下,镜面的反射率为 94.24% 。随着释放孔尺寸的增大,释放孔间距的减小,释放孔数目增多,镜面反射率急剧下降。

3 释放孔的衍射效应

图 1 所示的释放孔结构类似一个多矩孔光栅,入射光线经变形镜反射后,衍射图样为一个二维 (2D) 正交点阵,中心光斑为零级主极强,从光斑中

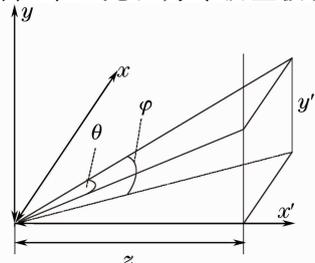


图 2 释放孔衍射结构示意图

Fig. 2 Diffraction schematic of etch holes

心向外强度减弱,向外分别为±1级、±2级等次极强。释放孔的衍射效应可以通过夫琅禾费衍射理论进行分析。设 a_1 和 a_2 分别为相邻释放孔在 x,y 方向的间距, b_1 和 b_2 分别为释放孔在 x,y 方向的尺寸, N_1,N_2 分别为 x,y 方向上的释放孔的数目, d_1

和 d_2 为变形镜单元尺寸,图2为释放孔衍射结构示意图,图中 θ 和 φ 为沿 x,y 方向的衍射角。一束平面波垂直入射至MEMS变形镜表面,镜面透射率函数为

$$t(x,y) = \sum_{n=-(N_1-1)/2}^{(N_1-1)/2} g_1(x+na_1) \sum_{m=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} g_2(y+ma_2),$$

$$g_1(x) = \begin{cases} 0, & |x| \leq b_1/2 \\ 1, & |x| > b_1/2 \end{cases}, \quad g_2(y) = \begin{cases} 0, & |y| \leq b_2/2 \\ 1, & |y| > b_2/2 \end{cases} \quad (2)$$

根据夫琅禾费衍射理论,对(2)式作傅里叶变换,得到透射光的远场光强分布函数为

$$I(\theta,\varphi) = I_0 \left[\frac{\sin(1/2 N_1 k a_1 \sin \theta) \sin(1/2 N_2 k a_2 \sin \varphi)}{\sin(1/2 k a_1 \sin \theta) \sin(1/2 k a_2 \sin \varphi)} \right]^2 \text{sinc}^2(1/2 k b_1 \sin \theta) \text{sinc}^2(1/2 k b_2 \sin \varphi), \quad (3)$$

式中 I_0 为入射光强度, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,当衍射面到镜面距离 $z \gg x',y'$ 时,近似有

$$\sin \theta \approx \frac{m\lambda}{a_1} \approx \frac{x'}{z}, \quad \sin \varphi \approx \frac{n\lambda}{a_2} \approx \frac{y'}{z}, \quad (4)$$

式中 m,n 为衍射级次, x',y' 为衍射面的空间坐标。

带有释放孔的MEMS变形镜单元衍射光场分布可以用一个互补屏进行描述,如图3所示。图中阴影区为反射区,开孔部分为透射区。三个屏开孔部分的面积分别为 Σ_1,Σ_2 和 $\Sigma_0,\Sigma_1,\Sigma_2$ 互补,即

$$\Sigma_1 + \Sigma_2 = \Sigma_0. \quad (5)$$

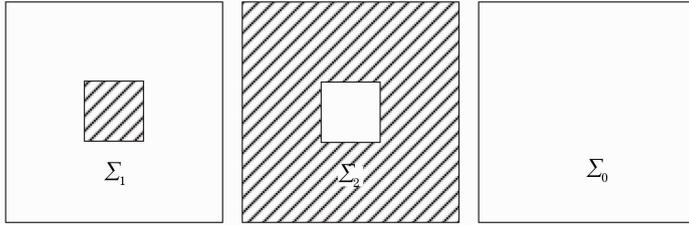


图3 巴比涅原理

Fig. 3 Principle of Babinet

若三个衍射屏在同一平面 p_0 的衍射光场分别为 $U_1(p_0),U_2(p_0),U_0(p_0)$,根据巴比涅原理,互补屏造成的衍射场复振幅之和等于自由光波场的复振幅^[7],即

$$U_1(p_0) + U_2(p_0) = U_0(p_0). \quad (6)$$

互补屏1的透射光场的复振幅等于带孔屏2反射光场的复振幅,即

$$U_1(p_0) = U_0(p_0) - U_2(p_0). \quad (7)$$

因此,带孔屏2(即带释放孔的MEMS反射镜面)的反射光强为

$$I = I_0 \text{sinc}^2\left(\frac{1}{2} k b_1 \sin \theta\right) \text{sinc}^2\left(\frac{1}{2} k b_2 \sin \varphi\right) - I(\theta,\varphi) \quad (8)$$

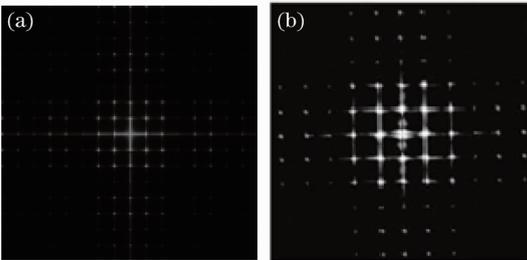


图4 MEMS镜面的反射光场分布。

(a) 计算结果; (b) 测试结果

Fig. 4 Distributions of the reflected light field.

(a) Calculation result; (b) measured result

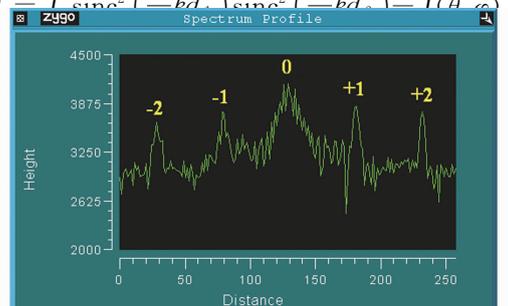


图5 各级衍射光强的测量值

Fig. 5 Measured results of different order diffraction light

将(3)式代入(8)式,计算入射平面光经图1所示的MEMS变形镜单元反射后的光强分布,其中 $a_1 = a_2 = 30 \mu\text{m}$, $b_1 = b_2 = 8 \mu\text{m}$,反射光强度分布如图4(a)所示,图4(b)为相应的测试结果。对照图4(a)、(b),说明这种规则排布的释放孔结构造成阵列结构的衍射光斑。图5为反射光各级衍射分布的实验结果,光能被分散到中央零级以外的其他衍射级次

上。实际应用中,自适应光学系统中,仅利用中央零级衍射光进行波前测量和校正,系统的光能利用率较低。

上述讨论中释放孔几何结构为方形,它是释放孔设计中常用的几何结构形式。实际也常常采用圆形结构,对圆形的释放孔结构,(3)式修正为

$$I(\theta, \varphi) = I_0 \frac{\pi \sin^2 \theta}{\lambda^2} \left[\frac{\sin(1/2 N_1 k a_1 \sin \theta) \sin(1/2 N_2 k a_2 \sin \varphi)}{\sin(1/2 k a_1 \sin \theta) \sin(1/2 k a_2 \sin \varphi)} \right]^2 \left[\frac{2J_1(k \sin \theta r)}{k \sin \theta r} \right], r = \sqrt{x'^2 + y'^2}, \quad (9)$$

式中 J_1 为一阶贝塞尔函数。释放孔的几何结构不同,引入的衍射光强分布的表达式不同,针对不同的几何结构,可以采用相应的衍射光强分布。

针对图1的的方形释放孔结构进行仿真,从(3)式出发,镜面反射光强分布主要由释放孔的两个结构参数:相邻释放孔间距和释放孔尺寸决定。下面通过两组仿真来说明这两个参数对器件光学效应的影响。一组MEMS变形镜的释放孔间距相等, $a_1 = a_2 = 28 \mu\text{m}$,释放孔的直径尺寸依次为2、4、6、8、10、12 μm ,计算中央零级光斑的归一化强度随释放孔

尺寸的变化,结果如图6(a)所示。图中,中央零级衍射斑强度随着释放孔直径尺寸的增加而减小,归一化强度从2 μm 的0.85下降到12 μm 的0.25,入射光强的绝大部分被分散到高衍射级次上。图6(b)为当释放孔的直径固定为10 μm ,释放孔间距依次为28、25、22、19、16、13 μm 时,中央零级衍射光的归一化强度的改变,从0.45变化到0.75。对同一直径释放孔,释放孔间距增大,中央零级的光强增加,衍射效应降低。

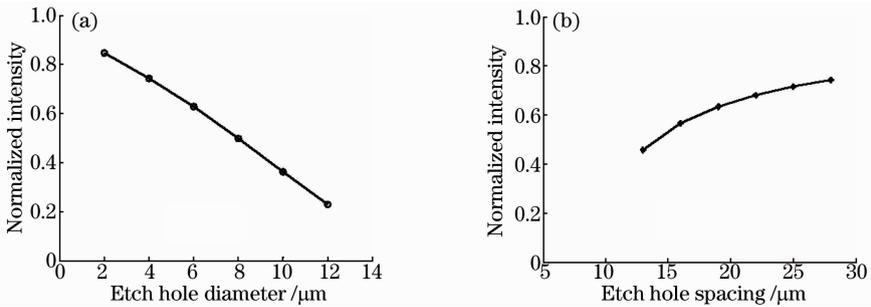


图6 零级衍射光的归一化强度随(a)释放孔尺寸和(b)相邻释放孔间距的变化

Fig. 6 Normalized intensity of zero order diffraction versus (a) etch hole diameter and (b) etch hole spacing

基于上述分析,表面工艺的MEMS变形镜的设计过程中,释放孔的设计非常关键,一方面释放孔尺寸过大或相邻两个释放孔间距过小,会降低镜面的有效反射面积,同时造成极强的衍射效应,使落在高阶衍射级次的光强增加,变形镜作为光学波前校正元件的光能利用率低,器件不利于在弱光环境下正常工作。另一方面,如果释放孔过小或相邻两个释放孔的间距过大,则可能造成牺牲层不能完全释放,镜面残余应力不能有效释放,导致变形镜表面面形变差,进而降低了变形镜的动态校正范围。因此,基于表面工艺的MEMS变形镜的设计中应根据工艺条件尽可能降低释放孔尺寸,同时排列稀疏,以提高

器件的光学性能。

4 释放孔对哈特曼波前测量性能的影响

哈特曼波前传感器是自适应光学系统中常用的一种波前测量器件,图7为哈特曼传感器的工作原理示意图。它用一个阵列微透镜对波前进行分割采样,每个微透镜作为一个子孔径,入射光束聚焦成一个光斑阵列,用一个阵列光探测器分别测出各光斑的中心坐标。先用标准的平行光照明阵列透镜,测出每一个子孔径对应的光斑中心坐标,作为参考基准。当入射波前有畸变时,子孔径范围内的波前倾斜将造成光斑的横向飘移,测量光斑中心在两个方向的中心漂移量,就可以求出各子孔径范围内的波

前在两个方向上的平均斜率^[8]。

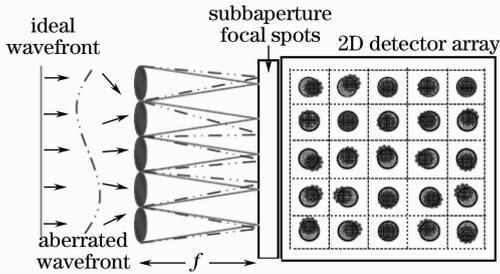


图7 哈特曼波前传感器的工作原理

Fig. 7 Working principle of Shark-Hartmann wavefront sensor

对于由 MEMS 变形镜和哈特曼传感器组成的自适应光学系统,一般情况下,哈特曼的子孔径与变形镜的驱动单元相对应,而 MEMS 变形镜的一个驱动单元包含一个由若干释放孔形成的阵列。设微透镜焦距为 $20\ \mu\text{m}$,单元口径为 $0.13\ \text{mm}$,对应的变形镜单个驱动单元内包含有释放孔尺寸为 $10\ \mu\text{m}$, 3×3 的释放孔阵列,经过变形镜反射后进入微透镜后的聚焦光斑如图8所示。图8(a)、(b)为微透镜

5 结 论

研究了释放孔对 MEMS 变形镜光学性能的影响。由于 MEMS 表面加工工艺的特点,释放孔的存在是不可避免的。变形镜表面的释放孔阵列一方面减少了变形镜面的有效反射面积,镜面的反射率降低;同时释放孔结构类似一个二维黑白反射光栅,入射光经过变形镜面反射,得到一个稳定的衍射光场分布,随着释放孔尺寸的增大、相邻释放孔间距的减小,衍射越强烈,落入高衍射级次的光强增加,变形镜的反射率进一步降低;另外,与哈特曼传感器配合构成自适应光学系统,子孔径内包含有多个释放孔,入射波面经过变形镜反射进入微透镜形成的聚焦光斑的光强降低,随着波前扰动的增强,相邻子孔径焦点的测量受到干扰,波前测量精度降低。

参 考 文 献

- Zhou Hong, Guan Chunlin, Dai Yun. Bimorph deformable mirrors for adaptive optics of human retinal imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0211001.
周虹,官春林,戴云.用于自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜[J].光学学报,2013,33(2):0211001.
- Wang Weimin, Tao Fenggang, Yan Shengmei, et al.. Study on a novel segmented micro deformable mirror with tip-tilt motion[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0716002.
汪为民,陶逢刚,颜胜美,等.新型分立式微变形镜研究[J].中国激光,2011,38(7):0716002.
- Yan Bin, Yuan Weizheng, Qiao Dayong, et al.. Study on resonant frequency for a novel MEMS micro scanning mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623004.

对应释放孔阵列的聚焦光斑和相应光强分布曲线,图8(c)、(d)为镜面无释放孔的微透镜聚焦光斑和相应光强分布曲线。图中可以看到明显的衍射现象。比较图8(b)、(d),图8(b)中曲线的高度小于图8(b)中焦点曲线的高度,且焦点曲线分布不光滑,光能被分散在其他的衍射级次。在文中仿真条件下,由于释放孔的影响,微透镜焦点光斑的强度只占没有释放孔时焦点光斑能量的约77%。在自适应光学系统中,进入哈特曼波前传感器的光能量是非常重要的,足够的光强条件下,才能保证波前像差测量的准确性。另外由于释放孔形成的衍射效应使相当一部分光能落在高衍射级次上,随着波前扰动的增强,焦点光斑偏移增大,高衍射级次落入其他的子孔径测量范围内,导致焦点位置测量的干扰,波前测量精度降低。因此减小释放孔的尺寸,同时增大孔间距,可以有效提高哈特曼波前传感器对畸变波前的测量性能。

燕斌,苑伟政,乔大勇,等.一种新型微机电系统扫描镜的谐振频率研究[J].光学学报,2012,32(6):0623004.

- Hu Fangrong, Ma Wenying, Wang Weimin. Fabrication of electro statically actuated MEMS deformable mirror with continuous surface[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 1016001.
胡放荣,马文英,汪为民.静电驱动连续面形微机电系统变形镜的制作[J].中国激光,2011,38(7):1016001.
- Shi Shali, Chen Dapeng. Study of sacrificial layer etch and release technology in MEMS device[J]. Micro Fabrication Technology, 2006, 6: 58-62.
石莎莉,陈大鹏.MEMS器件牺牲层腐蚀释放技术研究[J].微细加工技术,2006,6:58-62.
- Cao Jianzhang, Zhang zhengjie, Li Jingzhen. Electromagnetic Field and Wave Theory[M]. Beijing: Science Press, 2010.
曹建章,张正阶,李景镇.电磁场与电磁波理论[M].北京:科学出版社,2010.
- Wang Shifan, Zhu Ziqiang. Principle of Modern Optics[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1998.
王仕璠,朱自强.现代光学原理[M].成都:电子科技大学出版社,1998.
- Zhou Wenchao, Peng Yong, You Anjing. An improved centroid detecting calculation method of Hartmann wavefront sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 061203.
周文超,彭勇,游安靖.提高哈特曼波前传感器质心探测精度的一种计算方法[J].激光与光电子学进展,2012,49(6):061203.

栏目编辑:史敏

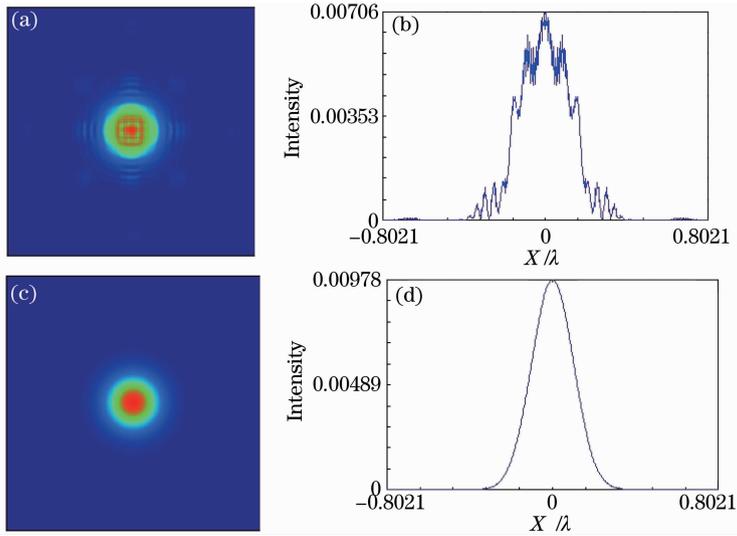


图 8 哈特曼传感器子孔径内聚焦光斑和对应的光强分布曲线。(a)、(b) 3×3 释放孔；(c)、(d) 无释放孔
 Fig.8 Focal spots and the corresponding intensity distribution curves in subaperture of Shark-Hartmann sensor.
 (a),(b) With 3×3 etch holes; (c),(d) without etch hole