

文章编号: 0258-7025(2008)08-1240-05

# 渐变反射率镜的设计与制备

吕国暖<sup>1,2</sup> 李大伟<sup>1,2</sup> 黄建兵<sup>1</sup> 易葵<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 按照高斯型渐变反射率镜(GRM)的参数要求,采用了中间层厚度渐变的方案对膜系和掩模板形状进行设计。根据薄膜的实际需求和具体的沉积设备,设计了掩模和掩模切换装置。在一次高真空环境下镀制了渐变反射率镜的所有膜系。采用直接测量的方法,测量了高斯型渐变反射率镜反射率的径向分布。测试结果表明,用这种技术制备的样品,与设计要求基本一致。分析得出,掩模板形状与精度对镀制结果有影响。随着设计尺寸减小,掩模板对膜料分子的散射作用增强,使样品中心反射率小于设计要求,边缘出现旁瓣。提出了减小基片与掩模板之间的距离和提高膜厚监控的精度改善方案。

**关键词** 光学薄膜;渐变反射率镜;渐变厚度层;高斯曲线;掩模

**中图分类号** O 484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1240

## Design and Fabrication of Graded Reflectivity Mirrors

Lü Guonuan<sup>1,2</sup> Li Dawei<sup>1,2</sup> Huang Jianbing<sup>1</sup> Yi Kui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** According to the parameter requirement of the graded reflectivity mirror (GRM) with Gaussian profile, the layer structure and the mask pattern were designed by using graded-thickness middle layer. The mask and the mask switchover equipment were designed considering the actual requirement of the thin films and the specific deposit facility. All layers of the graded reflectivity mirror were deposited in one high vacuum environment. Using a direct measuring method, the radial reflectivity distribution of graded reflectivity mirror with Gaussian profile was measured. The measuring results indicate that the graded reflectivity mirror with Gaussian profile prepared with this technique is basically in accordance with the design requirement. Analysis indicates that the mask pattern and accuracy influence the deposit result. The scattering effect of the mask on the material molecules increases with the decrease of the design dimension, the center reflectivity of the sample becomes lower than the design requirement, and the side lobe arises at the edge of the sample. The improving methods are proposed as decreasing the distance between the substrate and the mask, and increasing the monitor accuracy of the layer thickness.

**Key words** optical films; graded reflectivity mirror; graded thickness layer; Gaussian curve; mask

## 1 引言

渐变反射率镜(GRM)<sup>[1~3]</sup>指的是腔镜的反射率从中心向边缘平缓下降,其中研究较多的是具有高斯(或超高斯)曲线轮廓的渐变反射率镜。用不同的方法计算了其谐振腔内的模式<sup>[4~6]</sup>和腔镜处的光场分布<sup>[7,8]</sup>,输出激光束具有高斯形状,近场纹波强度大大减少,远场强度得到改善,光束质量大大提高<sup>[2,9~11]</sup>。高斯光束得到广泛的关注和应用,引起

高斯光束传输特性的相关研究<sup>[12~17]</sup>。

渐变反射率镜基于高反射率介质膜,通过膜层厚度的空间渐变来实现反射率的空间变化。一般有两种实现途径,一种是利用小圆孔掩模板的阴影效应<sup>[3,18]</sup>,掩模板固定放置于蒸发源和基片之间。相对于小尺寸的蒸发源,掩模板在基片上形成阴影区。沉积膜层时,在该区域内就能实现厚度渐变。这种工艺适合镀制小尺寸、高斯阶数较高的渐变反射率

收稿日期:2007-10-09;收到修改稿日期:2008-01-09

作者简介:吕国暖(1982—),男,广东人,硕士研究生,主要从事光学薄膜制备工艺的研究。E-mail:lgn@siom.ac.cn

导师简介:易葵(1970—),男,湖南人,研究员,硕士生导师,主要从事光学薄膜制备工艺和测试技术的研究。

E-mail:kyi@siom.ac.cn

镜。另一种途径是使用具有特定轮廓的掩模板<sup>[1]</sup>, 基片靠近掩模板并相对于掩模板旋转。基片不同半径处相对于蒸发源的张角不同, 得到不同的平均沉积速率。这种工艺适合镀制大尺寸和任意高斯阶数的渐变反射率镜。本文介绍了渐变反射率镜的设计方法和光学性能, 使用自制的掩模和掩模切换装置在电子束蒸发镀膜机内镀制渐变反射率镜的工艺流程并分析了结果。

## 2 渐变反射率镜的设计和光学性能

高斯(或超高斯)型渐变反射率镜的性能要求

$$R(r) = R_0 \exp[-2(r/\omega)^n] + R_{\text{out}}, \quad (1)$$

式中  $R_0$  为中心反射率,  $r$  为径向变量,  $\omega$  为膜斑半径,  $n$  为高斯阶数,  $R_{\text{out}}$  为边缘反射率。在 YAG 激光器中一般要求  $R_{\text{out}} = 0$ ,  $R_0 = 40\% \sim 90\%$ ,  $n = 2 \sim 5$ ,  $\omega = 1 \sim 10$  mm。

渐变反射率镜的膜系结构主要有三种<sup>[1]</sup>: 1) 全部膜层厚度渐变, 这种结构使用引言所述的第一种途径实现。2) 顶层厚度渐变, 其余为均匀厚度层。一般来说, 这种结构的中心反射率不高。3) 中间层厚度渐变, 又叫三明治结构(如图 1 所示), 可以实现较高的中心反射率和任意的高斯阶数。三明治结构基于高反膜系  $(\text{HL})^k \text{H}$ , 不同的是中间层改成了变

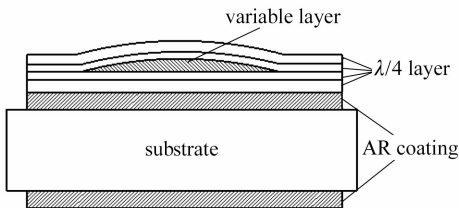


图 1 三明治结构渐变反射率镜示意图

Fig. 1 Schematic representation of GRM's sandwich type

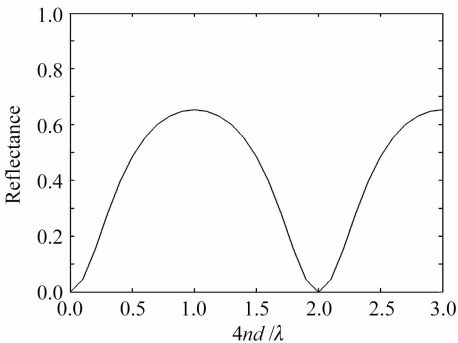


图 2 五层反射膜堆栈反射率随中间层厚度变化的曲线 ( $n_h = 1.93, n_l = 1.53$ )

Fig. 2 Reflectance of a coating made of five-layer stack ( $n_h = 1.93, n_l = 1.53$ ) as a function of the optical thickness of the middle layer with AR coating

化厚度层, 其厚度从中心的最大值 ( $\lambda/4$ ) 向边缘递减至零。中心反射率的大小可以通过高反膜的层数和变化厚度层的厚度来调整。图 2 显示了在减反膜 (AR) 基础上高低折射率分别为 1.93 和 1.53 的五层堆栈中, 反射率随中间层厚度变化的曲线。当中间层光学厚度为  $\lambda/4$  时, 膜层的反射率达到最大值。随着厚度减小或增大, 反射率都相应地减小, 当厚度为零和半波长时, 反射率达到最小。渐变反射率镜中心处可看作高反膜, 边缘处则可看作对于工作波长的虚设层, 其光谱特性与窄带滤波片相似。图 3 为渐变反射率镜中心和边缘的反射光谱。

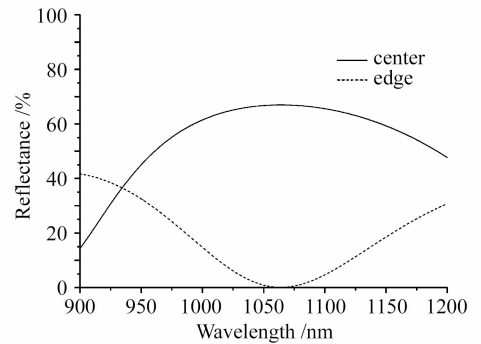


图 3 渐变反射率镜中心和边缘的模拟反射光谱

Fig. 3 Simulated reflectance spectra at the center and at the edge of GRM

根据(1)式的要求, 由  $R_0$  选择适合的堆栈层数。变化厚度层的膜厚变化可以计算为<sup>[3]</sup>

$$d(r) = \frac{\lambda}{4\pi n_v} \arccos \left\{ \frac{(1 + r_1^2 r_2^2) R(r) - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2 [1 - R(r)]} \right\}, \quad (2)$$

式中  $r_1, r_2$  为变化厚度层与两边膜层之间的等效反射系数,  $n_v$  为变化厚度层的折射率,  $\lambda$  为工作波长。

沉积薄膜时, 基片相对掩模板匀速转动。假设基片表面处于蒸发源分子的均匀辐射中, 被镀表面各点最终能沉积的厚度  $d(r)$  与掩模板在半径  $r$  处所张开的角度  $\theta(r)$  成正比<sup>[1]</sup>

$$\theta(r) = \theta_0 d(r)/d_0, \quad (3)$$

式中  $d_0$  为膜层中心处的厚度,  $\theta_0$  为膜层中心处的张角。 $\theta_0$  可根据中心反射率来确定, 当  $d_0 = \lambda/4n_v$  时, 令  $\theta_0 = 2\pi$ 。由图 4 中基片、掩模板和蒸发源的几何关系可得<sup>[19]</sup>

$$\rho = (1 - d/H)r, \quad (4)$$

由(3)和(4)式得出  $\rho(r)$  处所开的角度为  $\theta(r)$ 。

由于厚度变化, 渐变反射率镜的反射光和透射光出现波前相位变化<sup>[20]</sup>

$$\Delta\varphi_R(r) = [\varphi_R(r) + 2\varphi_{\text{air}}] - \varphi_R(0), \quad (5)$$

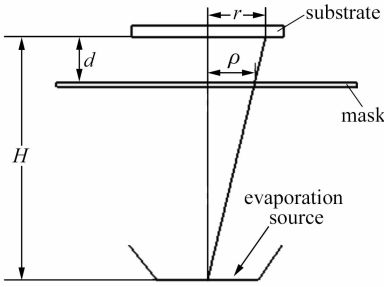


图 4 基片、掩模板和蒸发源的几何关系

Fig. 4 Geometric relation of substrate, mask and evaporation source

$$\Delta\varphi_T(r) = \varphi_T(0) - [\varphi_T(r) + \varphi_{\text{air}}], \quad (6)$$

式中  $\varphi_R(r)$  和  $\varphi_T(r)$  分别为反射光和透射光的相位,  $\varphi_{\text{air}} = 2\pi[d(r) - d_0]/\lambda$  为空气中传播的光程差。

图 5 是一个设计实例,对于  $1.064 \mu\text{m}$  的工作波长要求  $R_0 = 0.6532$ ,  $n = 2$ ,  $w = 9 \text{ mm}$ , 其反射率轮廓如图 5(a) 所示。使用膜料的折射率分别为 1.93 和 1.53, 计算得出的膜系为 (HL) $\cdot 2$ H, 其中第三层是变化厚度层, 其物理厚度变化如图 5(b) 所示。基片与掩模板距离 5 mm, 在蒸发源上方 310 mm, 设计出的掩模板形状如图 5(c) 所示, 随着半径增大, 开孔的张角逐渐变小。一般来说, 膜斑半径较大的掩模板较容易制作。当膜斑半径较小时, 掩模板的制作精度就会受到限制。图 5(d) 为反射光波前的相位变化。

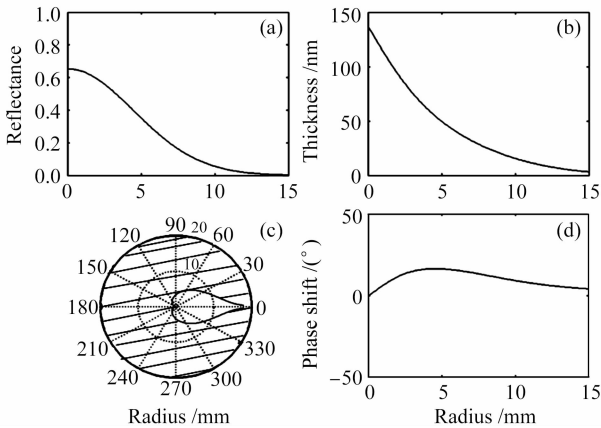


图 5  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $n = 2$ ,  $w = 9 \text{ mm}$ ,  $R_0 = 0.6532$  的三明治结构高斯型渐变反射率镜的反射率轮廓(a), 变化厚度层膜厚分布(b), 掩模板形状(c)和反射光波前相位变化(d)

Fig. 5 Calculated reflectance variation (a), thickness variation (b), calculated mask profile (c), distortion of the reflected phase front (d) for a Gaussian GRM of the sandwich type with  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $n = 2$ ,  $w = 9 \text{ mm}$ ,  $R_0 = 0.6532$

### 3 渐变反射率镜的制备

使用上述设计参数制备样品。不加烘烤, 本底真空抽至  $3.1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。高折射率材料为  $\text{TiO}_2$  (70%) 和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (30%) 混合材料, 氧分压为  $2.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ; 低折射率材料为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。两种膜料在该工艺下测定的折射率分别为 1.93 和 1.53。采用光学厚度监控, 监控片位于镀膜机中轴线上, 镀膜时监控片和基片上沉积速率不同, 但两者有一定关系。镀制工作波长为  $1.064 \mu\text{m}$  的渐变反射率镜, 采用的监控波长为 505 nm。镀膜时基片匀速旋转, 在镀制厚度变化层前后, 通过掩模切换装置加入和撤去掩模板。

### 4 渐变反射率镜的测试

渐变反射率镜可以通过间接和直接的方法进行测量。间接方法指测量渐变反射率镜径向上的厚度分布<sup>[3]</sup>。直接方法指的是测量渐变反射率镜对于工作波长的反射率或透射率分布<sup>[1, 3]</sup>。图 6 是用于直接测量渐变反射率镜透射率的装置图。由发光二极管抽运的 Nd:YAG 激光器输出脉冲激光, 经过衰减器和聚焦透镜后, 被分光器分成两束, 一束由能量计 2 收集, 用于监测; 另一束垂直入射到放置于二维移动平台上的样品, 透射后由能量计 1 收集。移动平台的运动通过可编程控制器由计算机控制。通过数据采集卡可以得出激光脉冲的能量。对样品进行测量前, 调节入射到样品上的光斑直径到  $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 。撤去样品, 让测试光直接入射到能量计 1 上, 测出两束光能量的比例关系。测量时, 沿着样品径向每隔 1 mm 测量一个点, 通过能量计 1 和能量计 2 测量每个点的平均入射能量和平均透射能量, 并计算出透射率。由于薄膜的吸收可以忽略, 可以得出样品径

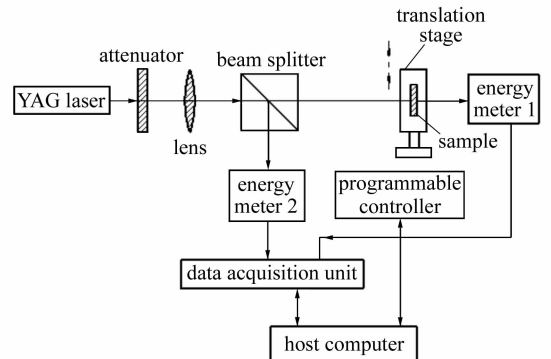


图 6 直接测量方法装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the equipment for a direct measuring method

向上的反射率分布。图 7 为使用直接方法测量设计镀膜样品的结果。结果显示样品的高斯阶数为 2, 膜斑半径为 9 mm。图 8 为使用分光光度计 Lambda-900 测量该样品的中心和边缘的反射率光谱曲线。为了增加空间分辨能力, 使用直径为 1 mm 的小孔以限制测量光斑的大小。

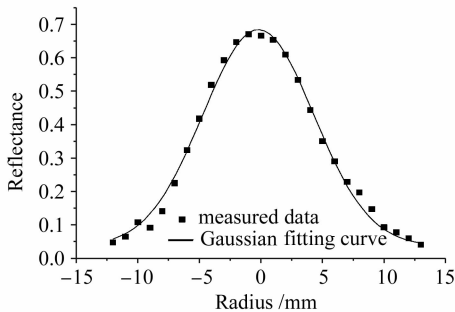


图 7 测量的反射率分布与高斯拟合曲线

Fig. 7 Measured reflectivity profile of the sample with the corresponding fitting curve

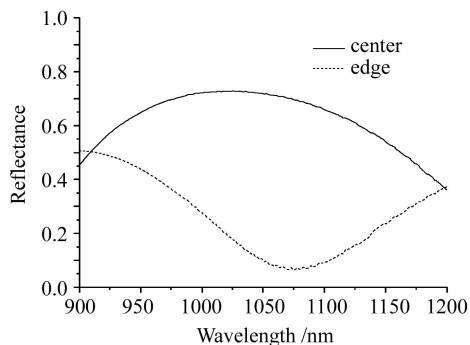


图 8 样品中心和边缘的反射率谱线

Fig. 8 Reflectance spectra at the center and at the edge of the sample

## 5 实验结果分析

测试结果表明本文的设计方法与工艺流程能制备出符合要求的渐变反射率镜。进一步分析, 发现如下规律: 1) 若装置的几何关系不变化, 当膜斑半径较大时 ( $\omega > 4$  mm), 掩模板开孔对膜料分子的散射可以忽略, 镀膜制出的样品的中心反射率和反射率轮廓符合设计要求。样品中心处的高反射区较宽, 对厚度误差敏感, 如图 8 中实线所示。随着膜斑半径的减小, 掩模板制作的难度增加, 掩模板开孔对膜料分子的散射逐渐明显。镀膜制出的样品的中心反射率小于设计要求, 同时边缘部分的反射率会受到影响。2) 减少基片与掩模板之间的距离可以减小散射作用对渐变厚度层的不良影响。3) 渐变反射率镜的边缘部分对于工作波长而言是虚设层, 其

光谱特性与窄带滤波器相似, 如图 8 中的虚线所示。因此边缘部分的反射率对膜厚的误差比较敏感, 较难做到零反射, 而且容易在边缘出现小的旁瓣。图 9 是一个设计参数为  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $n = 2$ ,  $\omega = 4$  mm,  $R_0 = 0.6532$  的样品的测量结果。由于掩模板对膜料分子的散射作用和镀膜过程中出现的膜厚误差, 中心反射率小于设计要求, 边缘出现旁瓣。

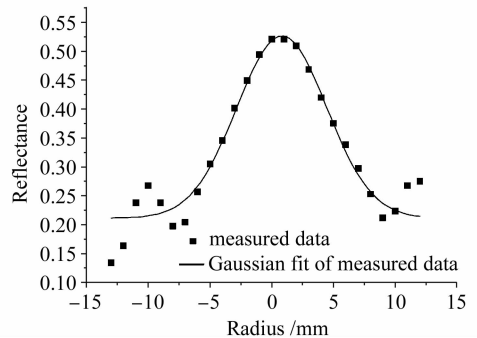


图 9  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $n = 2$ ,  $\omega = 4$  mm,  $R_0 = 0.6532$  样品测量的反射率分布与高斯拟合曲线

Fig. 9 Measured reflectivity profile of the sample with the corresponding fitting curve at  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $n = 2$ ,  $\omega = 4$  mm,  $R_0 = 0.6532$

为了镀膜半径较小的渐变反射率镜, 应尽量减小基片与掩模板之间的距离, 并使用精度较高的掩模板。另外, 可以利用小圆孔掩模板的阴影效应。

## 6 结论

介绍了三明治结构高斯型渐变反射率镜的设计方法、镀膜工艺和测量方法。使用自行设计的掩模和掩模切换装置, 在高真空环境下一次镀膜制了渐变反射率镜的所有膜系。测量结果表明, 用这种技术制备的高斯型渐变反射率镜与设计要求基本一致。进一步研究发现, 掩模板形状与制作精度对镀膜结果的影响较大。随着膜斑半径减小, 掩模板制作难度增大, 并对膜料分子产生明显的散射作用, 导致样品偏离设计要求。减小基片与掩模板之间的距离可以减小对膜料分子散射作用的影响。三明治结构高斯型渐变反射率镜边缘的反射率对膜厚误差比较敏感。镀膜边缘处要求零反射的样品, 需要精确地控制膜层的厚度。

## 参 考 文 献

- 1 G. Duplain, P. G. Verly, J. A. Dobrowolski *et al.*. Graded-reflectance mirrors for beam quality control in laser resonators [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(7):1145~1153

- 2 M. Morin. Graded reflectivity mirror unstable laser resonators [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1997, **29**(8):819~866
- 3 G. Emiliani, A. Piegari, S. De Silvestri *et al.*. Optical coatings with variable reflectance for laser mirrors [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14):2832~2837
- 4 U. Ganiel, A. Hardy. Eigenmodes of optical resonators with mirrors having Gaussian reflectivity profiles [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(9):2145~2149
- 5 Wang Ning, Lu Yutian, Kong Yong. Analysing the light intensity distribution of super-Gaussian mirror resonator by fast Fourier-transform [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1317~1322  
王 宁, 陆雨田, 孔 勇. 用快速傅里叶变换法分析超高斯反射镜腔的光场分布[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11):1317~1322
- 6 Nathalie McCarthy, Pierre Lavigne. Large-size Gaussian mode in unstable resonators using Gaussian mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(11):553~555
- 7 Nathalie McCarthy, Pierre Lavigne. Optical resonators with Gaussian reflectivity mirrors: output beam characteristics [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21):3845~3850
- 8 Ling Dongxiong, Fu Yunchang, Fan Zebin. Matrix analysis of eigen mode-fields of the circular plano-concave resonator with a Gaussian-reflectivity mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):25~28  
凌东雄, 伏云昌, 樊则宾. 高斯型变反射率圆镜平凹腔本征模场的矩阵分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):25~28
- 9 Li Wei, Feng Guoying, Chen Jianguo *et al.*. Numerical simulation for transformation of annular laser beam in Cassegrain multi-pass amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1214~1219  
李 玮, 冯国英, 陈建国 等. 对卡塞格林式多程放大器中环形光束传输的数值模拟[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1214~1219
- 10 Mark S. Bowers. Diffractive analysis of unstable optical resonators with super-Gaussian mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(19):1319~1321
- 11 Sandro de Silvestri, Vittorio Magni, Orazio Svelto *et al.*. Lasers with super-Gaussian mirrors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(9):1500~1509
- 12 Pan Liuzhan. Far-field behavior of partially polarized Gaussian Schell-model beams diffracted through an aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1250~1255  
潘留占. 被光阑衍射部分偏振高斯-谢尔模型光束的远场特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1250~1255
- 13 Liu Hongzhan, Xu Rongwei, Liu Liren *et al.*. Far-field approximation and divergence of Gaussian beam with phase aberrations diffracted by a circular aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):131~135  
刘宏展, 徐荣伟, 刘立人 等. 圆孔受限波差高斯光束的远场近似及发散度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):131~135
- 14 Jia Xuemei, Xie Xinglong. Propagation property of Gaussian beams passing through spatial filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1220~1224  
贾雪梅, 谢兴龙. 高斯光束通过空间滤波器的传输特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1220~1224
- 15 Degang Deng, Chaoyang Wei, Kui Yi *et al.*. Propagation properties of beam generated by Gaussian mirror resonator [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **258**:43~50
- 16 Degang Deng, Chaoyang Wei, Youwei Tian *et al.*. Propagation properties of a hard-edge diffracted beam generated by a Gaussian mirror resonator [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(25):6435~6441
- 17 Yajun Li. Propagation and focusing of Gaussian beams generated by Gaussian mirror resonators [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(9):1832~1843
- 18 Pasquale Cusumano, Giuseppe Lullo, Angelo Mangione *et al.*. Graded reflectivity micromirror arrays [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(1):143~147
- 19 Li Xinchang. Mask design and vacuum coating of graded light-filtering chromium thin film [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 1999, **28**(4):16~19  
李新昌. 渐变滤光铬膜的遮板设计与真空镀制[J]. *电子工业专用设备*, 1999, **28**(4):16~19
- 20 Angela Piegari. Coatings with graded-reflectance profile: conventional and unconventional characteristics [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28):5509~5519