

# 高功率激光系统中缺陷引起的近场调制分析

尤科伟<sup>1,2</sup> 张艳丽<sup>1</sup> 张雪洁<sup>1</sup> 张军勇<sup>1</sup> 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中科院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 高功率激光装置中通过测量光束强度分布来评价近场光束质量。然而测量结果为一稳态分布, 并不能真实反映经噪声扰动后光束的强弱调制演变特性, 可能会忽略传输过程中存在的调制较为严重的区域。针对此问题着重研究了光束经噪声扰动后的近场传输演化特性, 进而对近场分布测量的局限性进行深化理解和补充。同时, 为简化分析单因素局部缺陷影响下不同传播距离处的近场分布变化规律, 引入等效菲涅耳数来表征近场强度调制特性。结果表明, 当实测近场分布中存在较弱调制信息时, 测量位置之前可能存在更为严重的调制区域。以调制为 $\pi$ 的相位型缺陷为例, 其最大调制相对于入射光强度可增大9倍。

**关键词** 物理光学; 近场光束质量; 等效菲涅耳数; 表面缺陷

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0302002

## Analysis of Near-Field Modulations Caused by Defects in High Power Laser System

You Kewei<sup>1,2</sup> Zhang Yanli<sup>1</sup> Zhang Xuejie<sup>1</sup> Zhang Junyong<sup>1</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In high power laser device, near-field beam quality is evaluated through the intensity distribution. However, the measured distribution is a steady state, which can not reflect the evolution features of intensity modulation caused by noise disturbances. Some area encountering serious intensity modulation may be ignored in transmission process. Near-field transmission characteristics of the beam disturbed by noise disturbance are studied. Meanwhile, deeper understanding of the limitations of the measured near-field intensity distribution is obtained. To simplify the analysis of the near-field intensity distribution at different distance under the influence of single local defect, the characteristics of near-field intensity modulation is represented by equivalent Fresnel number. The results show that once a weak modulated information appears in the distribution of measured near-field intensity, there may be a more serious modulation area before the measurement position. A highest modulation can be up to nine times for a phase type defects with  $\pi$  delay corresponding to incident intensity.

**Key words** physical optics; near-field beam quality; equivalent Fresnel number; surface defect

**OCIS codes** 260.1960; 060.5060; 050.1960

## 1 引言

光束质量不仅是衡量激光器输出性能的重要指标, 同时还影响着激光系统的负载能力及物理实验的成败。光束经光学元件及空气传输后会受到不同程度的扰动, 经扰动的近场光束强度分布在传输过程中千变

收稿日期: 2015-09-21; 收到修改稿日期: 2015-11-03

作者简介: 尤科伟(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光传输演变与质量控制等方面的研究。

E-mail: you.ke.wei@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光器件设计, 光学精密机械设计与制造工艺等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

万化,因而诊断系统测量的近场并不能准确反映近场传输光束的调制状况。根据扰动光束衍射过程中的光学性质,噪声源对传输光场的扰动主要分为振幅调制和相位调制。振幅型调制的缺陷主要有灰尘、污染物等;相位型调制的缺陷主要有麻点、划痕、亚表面缺陷等。不同物理过程产生的近场扰动在场图上会表现出不同形态特征的纹理。对神光II装置的光束质量进行测量发现,近场分布中会出现如图1所示的大区域直条纹和局域圆形衍射斑等调制信息。光学元件表面缺陷作为形成局域衍射斑的一个重要因素,在强烈的热效应和场效应下引起的振幅和相位畸变在光传输过程中的调制增强不仅会破坏近场的均匀性,还将成为元件抗损伤的薄弱点<sup>[1-3]</sup>。因此,全方位地研究光学元件表面缺陷对光束近场传播的影响,将有助于加深对系统中光束质量的理解。

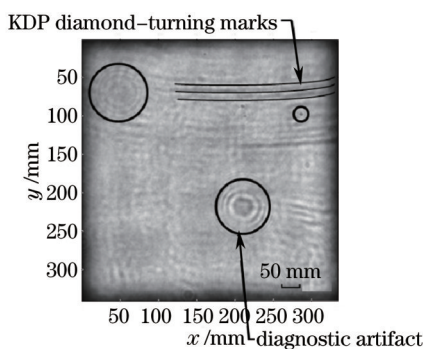


图1 实际测量近场强度分布

Fig.1 Near-field intensity distribution of actual measurement

目前国内外对高功率激光装置中元件表面缺陷问题的研究,大多侧重于对元件损伤的影响。Mainguy等<sup>[4-5]</sup>基于CEA MIRÓ研究了元件前后表面缺陷对激光链路中光学元件的影响,并提出相位调制型缺陷会引起强烈的调制。Génin等<sup>[6-7]</sup>建立了缺陷模型,并详细分析了缺陷对光学元件损伤阈值的影响,指出缺陷的存在会降低光学元件的损伤阈值。上述研究结果主要通过数值模拟分析得到。考虑到圆孔菲涅耳数作为衡量光学系统衍射效应的重要物理参量,具有物理图像清晰等优点,本文提出利用等效菲涅耳数来简化分析光学元件表面缺陷引起的衍射光场。通过对等效菲涅耳数的讨论和验证,获得传播光束近场衍射形态的演变规律,为深化理解近场光束质量从而改善近场光束质量及降低光学元件损伤几率提供一定的参考。

## 2 等效菲涅耳数模型

以典型的圆形缺陷为例,研究其对光束近场衍射效应的影响,物理模型如图1所示。图中均匀入射的光场 $U_0$ ,受到元件后表面局部单一缺陷调制,缺陷半径为 $r$ ,在距离后表面 $z$ 处观察平面的光场为 $U$ 。

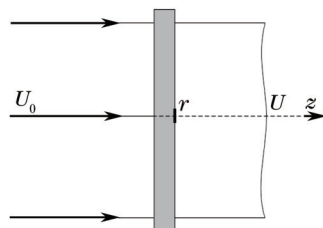


图2 模型示意图

Fig.2 Schemes of physics model

理论计算一般采用角谱理论<sup>[8-9]</sup>,考虑到菲涅耳数的实质是通过轴上点的性质对衍射场进行分析,且大口径光学元件表面小尺度缺陷引起的衍射光场与圆孔衍射具有一定联系,因此可以推导获得缺陷的等效菲涅耳数表达式。圆孔菲涅耳数的定义为从光源出发分别经光阑边缘和沿光轴传播到达轴上观察点的两列子波的光程差除以半波长。轴上光强极值点都是在菲涅耳数为整数时取得,菲涅耳数为奇数时,轴上光强为极大值<sup>[10]</sup>。与此对应,光学元件表面缺陷的等效菲涅耳数采用相同规定,轴上光强极值位置对应整数菲涅耳数。

针对光学元件后表面存在缺陷的情况,当背景光场近似为平面波时,根据圆孔衍射轴上点的复振幅分布<sup>[11]</sup>,可以得出经局域缺陷调制后光束在传播过程中轴上点的复振幅分布为

$$U = U_0 \left\{ t \exp(j\phi) \left[ 1 - \exp\left(\frac{jk}{2z} r^2\right) \right] + \exp\left(\frac{jk}{2z} r^2\right) \right\}, \quad (1)$$

式中  $\phi$  为缺陷引入的相位调制,  $t$  为振幅透过率。轴上点强度分布为

$$I = I_0 \left[ 1 + 4t^2 \sin^2\left(\frac{k}{4z} r^2\right) - 4t \sin\left(\frac{k}{4z} r^2\right) \sin\left(\frac{k}{4z} r^2 - \phi\right) \right], \quad (2)$$

对(2)式求导并令导数为零,且满足等效菲涅耳数为奇数时,轴上光强为极大值,则缺陷的等效菲涅耳数可表示为

$$N = \begin{cases} \frac{r^2}{\lambda z} - \frac{\arctan\left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi - t}\right)}{\pi} + 1, & (\cos \phi - t > 0) \\ \frac{r^2}{\lambda z} - \frac{\arctan\left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi - t}\right)}{\pi}, & (\cos \phi - t < 0 \text{ or } \phi = 0) \end{cases}, \quad (3)$$

当  $\phi = 0$  时,(3)式即为纯振幅型缺陷的等效菲涅耳数表达式。当  $\phi \neq 0$  且  $t=1$  时,纯相位型缺陷的等效菲涅耳数可表示为

$$N = \frac{r^2}{\lambda z} + \frac{1}{2} - \frac{\phi}{2\pi}. \quad (4)$$

当缺陷位于光学元件前表面时,需对(3)式中的传播距离  $z$  进行修正。考虑缺陷对元件自身的影响时,传播距离需修正为  $nz'$ ,其中  $n$  为元件折射率, $z'$  为光束在元件中的传播距离;考虑缺陷对后续光学元件的影响时,传播距离修正为  $nL+z'$ ,其中  $L$  为元件厚度, $z'$  为光束在空气中的传播距离。虽然光学元件表面缺陷形状各异,但可在圆形缺陷等效菲涅耳数的基础上进行与缺陷形状相关的修正<sup>[12]</sup>。

### 3 模拟分析

利用数值计算和等效菲涅耳数来详细分析缺陷调制后的传播光场。选取光束采样尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 采样点为  $1024 \times 1024$ 。高功率激光装置中传输光束为高阶超高斯光束,为简化分析采用平面波入射,其波长为  $1053 \text{ nm}$ ,缺陷初始半径为  $0.2 \text{ mm}$ 。为表征调制光束传播过程中轴上点强度增加的倍数,用相对光强  $I/I_0$  来描述,其中  $I_0$  为入射光强,  $I$  为轴上  $z$  处光强。

根据(2)式可知,光斑经纯振幅调制、纯相位调制及相位和振幅调制兼有的缺陷后,传播光束轴上点光强随传播距离的变化关系如图 3(a)所示。图中黑色实线和红色虚线分别为公式计算与数值模拟所得结果,可以看出两结果较吻合。为系统地分析缺陷对传播光束的影响,将传播光束分为 3 个区域,如图 3(b)所示,其中 A 为调制强区, B 为下降区, C 为稳定区。

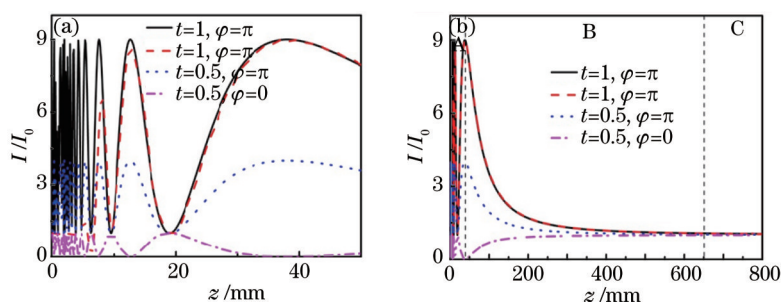


图 3 不同类型缺陷调制后轴上点相对光强随传播距离的变化关系。(a)  $z=50 \text{ mm}$ ; (b)  $z=800 \text{ mm}$

Fig.3 Relative intensity distributions of axial point versus propagation distance with different type of defects.

(a)  $z=50 \text{ mm}$ ; (b)  $z=800 \text{ mm}$

当等效菲涅耳数大于 1 时,光束处于小尺度缺陷近场,即调制强区 A 区。随着传播距离的增加,轴上点相对光强剧烈振荡,并在等效菲涅耳数为奇数时取得极大值;当高能激光调制增强到一定程度时则可能诱导下游光学元件的损伤,而元件的损伤将进一步加重光束的调制,严重影响光束质量。光束经不同类型缺陷调制,其受调制程度随振幅透过率  $t$  与调制相位  $\phi$  的变化而变化,如图 4(a)所示。可以看出轴上点最大相

对光强 ( $I_{\max}/I_0$ ) 随缺陷振幅透过率与调制相位的增加呈金字塔式增加, 在  $(1, \pi)$  点达到塔尖最大值, 可达 9 倍。当缺陷对传播光束存在相同相位调制时, 缺陷对光束的调制程度随振幅透过率的增加而增加。

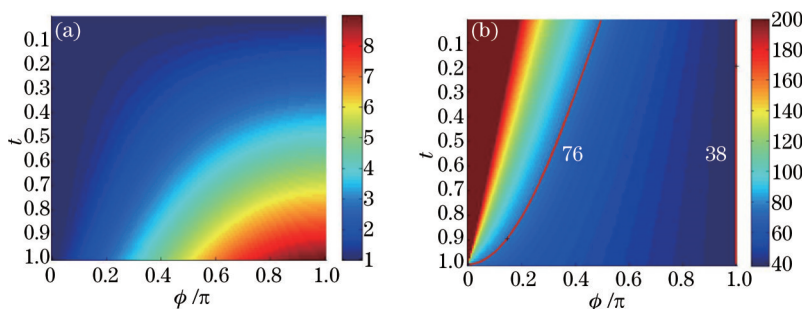


图 4 (a) 轴上点最大相对光强随振幅透过率与调制相位变化的关系; (b) 等效菲涅耳数为 1 时光束的传播距离随振幅透过率与调制相位变化的关系

Fig.4 (a) Maximum relative intensity distribution of axial point versus amplitude transmittance and phase modulation; (b) propagation distance versus amplitude transmittance and phase modulation when equivalent Fresnel number is 1

缺陷振幅透过率和调制相位的变化不仅影响光束的调制程度, 同样也会造成光束的调制范围发生变化。图 4(b) 为等效菲涅耳数为 1 时光束的传播距离  $z_N$  (传播距离大于 200 mm 的区域均作 200 mm 处理)。可以看出,  $z_N$  随调制相位和振幅透过率的增加呈梯度下降。根据 (3) 式, 曲线  $\cos \phi - t = 0$  可将图 4(b) 分为两部分。图右侧振幅透过率和调制相位改变时  $z_N$  变化缓慢, 其变化范围为  $Ar^2/\lambda, [A \in (1, 2)]$ , 而左侧变化迅速, 变化范围为  $Ar^2/\lambda, [A \in (2, +\infty)]$ 。进一步分析图 4(b), 当调制相位较大时, 振幅透过率的改变对传播距离影响较小。

采用等效菲涅耳数不仅能够快速获得光束的调制信息, 同样可以得到光束位于缺陷近场时的分布。从图 5 可见, 缺陷调制区域边缘有一尺寸较大黑暗暗环, 暗环内缺陷引起的子光束相互干涉叠加, 产生强烈的调制, 且明暗条纹数目与等效菲涅耳数的数值有着——对应的关系。暗环外缺陷衍射场与平面光场叠加, 同样会对一定范围内的光束产生调制, 一定程度上影响了传播光场的均匀性。

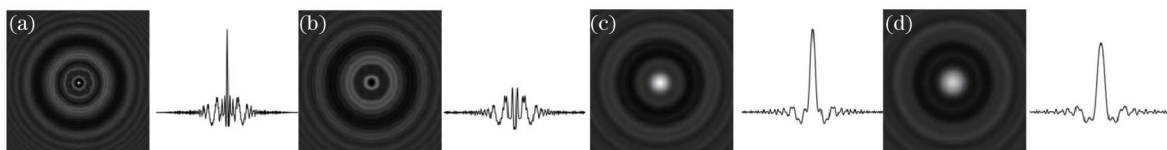


图 5 缺陷相位调制  $\phi = 1/2\pi, t = 1$  时, 等效菲涅耳数取不同值时的衍射光强分布。(a)  $N = 7$ ; (b)  $N = 4$ ; (c)  $N = 1$ ; (d)  $N < 1$

Fig.5 Different diffraction intensity distributions when  $\phi = 1/2\pi$  and  $t = 1$ . (a)  $N = 7$ ; (b)  $N = 4$ ; (c)  $N = 1$ ; (d)  $N < 1$

对实际使用后的大口径光学元件进行检测发现, 高能激光作用后的元件前表面会出现最大半径约 0.5 mm 的损伤点<sup>[13]</sup>, 若损伤点导致的相位调制为  $\pi$ , 而大口径钕玻璃的厚度为 40 mm, 则钕玻璃后表面处最大强度增加约 5.6 倍。当光学元件后表面因自身缺陷等因素使元件损伤阈值降低时, 经此类缺陷调制后的高能激光入射到元件后表面, 一定程度上会增大损伤的风险。根据光束在元件内部传播时的修正等效菲涅耳数可知, 当缺陷调制相位为  $\pi$  时, 最大强度在 40 mm 位置处的缺陷半径分别约为 0.17、0.29、0.37、0.44 mm。为防止激光对光学元件后表面的破坏, 在元件检测过程中需尽量控制这些尺寸的缺陷。因此, 通过修正等效菲涅耳数的简单估算, 可快速判断缺陷引起的衍射场的调制状况, 为合理地选择元件厚度及排布后续元件提供依据。

当等效菲涅耳数小于 1 时, 光束进入下降区 B 区, 随着传播距离的增加, 缺陷对光束的调制程度将逐渐减小并趋于稳定。由图 6(a) 可以看出, 缺陷的相位调制越大, 轴上点相对强度下降越快。为保证后续光束的质量, 需将调制程度控制在 1.4 以内<sup>[14]</sup>。对 (2) 式进行解析可得

$$z = \frac{kr^2}{4 \arccos \left[ 0.5 \sqrt{\frac{4b}{a} + 2 \sqrt{4 \left( \frac{b^2}{a^2} - \frac{c}{a} \right)}} \right]}, \quad (5)$$

式中  $a = 2 - 2 \cos \phi$ ,  $b = 1.9 - 1.9 \cos \phi - 0.5 \sin^2 \phi$ ,  $c = 1.81 - 1.8 \cos \phi - \sin^2 \phi$ , 根据(5)式可得轴上点相对强度为 1.4 时, 传播距离随调制相位变化的关系, 如图 5(b) 所示, 可以看出图中曲线基本关于  $0.5\pi$  对称。当调制相位为  $0.5\pi$  时, 光束的传播距离最远为 650 mm, 等效菲涅耳数约为 0.3。为了避免缺陷调制影响后续光束质量, 需将后续光学元件置于 650 mm 之后, 即安全距离。通过对(5)式分析可知, 安全距离与缺陷半径的平方成正比关系, 即缺陷尺寸越大, 光束受影响范围越大, 但等效菲涅耳数的数值不变。因此可通过等效菲涅耳数来区分缺陷的下降区和远场。

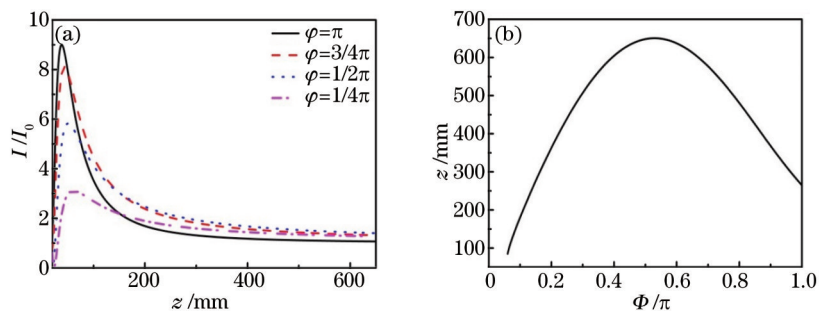


图 6 (a) 经不同相位调制缺陷影响后轴上点相对光强随传播距离的变化关系; (b)  $r=0.2$  mm,  $t=1$ , 轴上点相对强度为 1.4 时, 光束传播距离随缺陷调制相位的关系

Fig.6 (a) Relative intensity distributions of axial point versus propagation distance with different phase modulations;

(b) propagation distance versus phase modulation when  $r=0.2$  mm,  $t=1$  and relative intensity of axial point is 1.4

当传播光束进入缺陷远场(稳定区 C 区), 光场分布如图 7 所示。可以看出缺陷对光束的调制程度较弱, 除局部圆形条纹的周期随传播距离的增加而微小增加外, 光场并没有随传播距离的增加而发生明显改变。因此当传播光束位于缺陷远场时, 光场分布较为稳定, 这与实测光束近场分布中缺陷对光束的调制状况相对应。因此光学元件表面缺陷尺寸较小时, 光束传播很近距离即进入缺陷衍射场的远场。当传播距离足够远时, 传播光场则表现为光学元件本身的菲涅耳衍射。

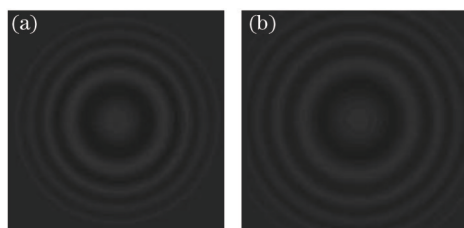


图 7  $r=0.2$  mm,  $\phi=1/2\pi$  时, 不同距离处的场分布。(a)  $z=1200$  mm; (b)  $z=1500$  mm  
Fig.7 Diffraction intensity distributions in different distances. (a)  $z=1200$  mm; (b)  $z=1500$  mm

## 4 结 论

光学元件表面缺陷是破坏光束近场均匀性, 制约系统负载能力提升的主要因素。为加强对光束近场的理解及缺陷对传播光束近场影响的分析, 在光束近场将传播光场分为 3 个不同区域, 并独立分析了不同区域内的光场特性。在菲涅耳衍射积分公式基础上, 获得了光学元件表面不同类型缺陷的等效菲涅耳数。在缺陷近场区域, 缺陷对光束强烈调制, 严重影响光束质量, 利用等效菲涅耳数的计算对光学元件的检测提出了具体要求。当等效菲涅耳数小于 1 时, 调制光束进入下降区, 调制程度逐渐减小并趋于稳定, 根据实际光束质量要求, 以半径为 0.2 mm 的相位型缺陷为例提出 650 mm 为安全距离。缺陷远场区域调制程度低且光场分布较为稳定, 这与实测近场分布中缺陷对光束的调制状况相对应。通过上述分析加深了对光学元件与小尺度缺陷近远场的理解, 从而能够加强对光束质量的分析与控制。后续还需加强对于光束近场分布的分析, 特别是各类扰动源留下的调制信息, 以期能够通过简易的反演计算来还原缺陷的调制强区及调制程度等信息。

## 参 考 文 献

1 L Lamaignère, G Dupuy, A Bourgeade, *et al.*. Damage growth in fused silica optics at 351 nm: refined modeling of large-beam experiments

- [J]. Applied Physics B, 2014, 114(4): 517–526.
- 2 J Bude, P Miller, S Baxamusa, *et al.*. High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5839–5851.
- 3 H Bercegol, A Boscheron, J M Di-Nicola, *et al.*. Laser damage phenomena relevant to the design and operation of an ICF laser driver[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(3): 032013.
- 4 S Mainguy, B L Garrec, M Josse. Downstream impact of flaws on the LIL/LMJ laser lines[C]. SPIE, 2005, 5991: 599105.
- 5 S Mainguy, I T Pecault, B L Garrec. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles[C]. SPIE, 2005, 5991: 59910G.
- 6 F Y Génin, M D Feit, M R Kozlowski, *et al.*. Rear-surface laser damage on 355-nm silica optics owing to Fresnel diffraction on front-surface contamination particles[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3654–3663.
- 7 N Shen, M J Matthews, S Elhadj, *et al.*. Correlating optical damage threshold with intrinsic defect populations in fused silica as a function of heat treatment temperature[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(16): 165305.
- 8 J W Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.  
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- 9 J A Ratcliffe. Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere[J]. Reports on Progress in Physics, 1956, 19(1): 188–267.
- 10 M Born, E Wolf. Principles of Optics[M]. Beijing: Science Press, 1978.  
波恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- 11 Lü Naiguang. Fourier Optics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998.  
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- 12 Yu Liping, Xu Xiaoling, Lin Qiang, *et al.*. Equivalent Fresnel numbers for regular polygon aperture and slit[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(8): 1137–1140.  
余礼平, 徐晓玲, 林 强, 等. 正多边形和狭缝的等效菲涅耳数[J]. 光学学报, 2000, 20(8): 1137–1140.
- 13 I F Stowers. Optical cleanliness specifications and cleanliness verification[C]. SPIE, 1999, 3782: 525–530.
- 14 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1643–1653.  
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643–1653.

栏目编辑: 宋梅梅