

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0090-05

光束取样光栅使用状态分析

占江徽 吴翠翠 高福华 阳泽健

(四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 光束取样光栅(BSG)是应用于惯性约束聚变(ICF)驱动器终端光学系统中的重要光学元件,它可将极小部分激光能量(约 0.1%)从主光路中分离出来,为系统激光参数的精密诊断提供取样信号。然而在实际应用中,由于系统光路结构复杂,入射到 BSG 的光束与理想情况总存在一定的偏差,影响了 BSG 取样光束信号的准确性和有效性。基于菲涅耳全息记录与再现原理,建立了 BSG 的使用状态模型并对其光束取样过程进行了深入研究,重点分析了照明光束存在波长偏移、入射角偏差或相位畸变时,BSG 取样光斑位置及其能量分布的规律。为实际工程系统中 BSG 的应用调整提供了参考。

关键词 衍射;光束取样光栅;菲涅耳全息理论;使用状态模型;相位畸变

中图分类号 TL632⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0090

Analysis on the Using State of Beam Sampling Grating

Zhan Jianghui Wu Cuicui Gao Fuhua Yang Zejian

(College of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Beam sampling grating (BSG) is an important optical element applied in the terminal optical system of inertial confinement fusion (ICF) drivers. It can separate a very slight part of laser energy ($\sim 0.1\%$) from the main beam, thus provide sampling signal for the precise diagnosis of the laser parameters. However, in application, there are always certain deviations between the incident beam lighting on the BSG's face and the ideal one, such as the lean of incident angle, wavefront distortion, etc.. These deviations affect the accuracy and validity of BSG's sampling signal. In this paper, a model of BSG's using state is established based on the theory of Fresnel holographic recording and representation, and the process of beam sampling is further studied. This paper emphatically analyzes the location and energy distribution of sampling spot when light wavelengths have wavelength shift, incident angle deviation or wavefront distortion. The analysis results of this paper provide theoretical reference for practical engineering of BSG in application system.

Key words diffraction; beam-sampling grating; Fresnel holographic theory; using state model; wavefront distortion

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)系统中为了满足所需要的强能量,目前主要采用光束对称照明的方式^[1],为了提高靶场的性能,要求各路光束之间的能量偏差非常小^[2]。因此打靶之前需要对终端光学系统的三倍频光进行能量及光束质量诊断。考虑到终端光学系统的光路排布、打靶实验对三倍频光的取样的要求,目前光束取样光栅(BSG)被看作是终端光学系统三倍频光束诊断最理想的光束取样方案^[3~7]。然

而在实际工程应用中,取样光栅的工作状态并不是非常理想,得到的取样光束与理想取样光束之间有一定偏差,这影响了 BSG 取样数据的准确性和有效性。因此,分析产生这些偏差的原因并找到相应的调整方案对于 BSG 的实际应用有十分重要的意义。本文主要讨论 BSG 在实际使用过程中,当入射光束存在波长偏移、入射角偏差或相位畸变时对其取样效果的影响。通过分析发现,入射光束的角度和波长偏差主要影响取样光斑的位置,而入射光束的相

基金项目: 国家 863 计划(804)资助课题。

作者简介: 占江徽(1983—),女,硕士研究生,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: liyuanjie54@gmail.com

导师简介: 高福华(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事衍射光学及光子技术等方面的研究。

E-mail: mender_gao@263.net(通信联系人)

位畸变主要影响取样光斑的能量分布。

2 理论分析

BSG 是应用于 ICF 驱动器终端光学系统中的重要光学元件,它可将极小部分激光能量(约0.1%)从主光路中分离出来,为系统激光参数的精密诊断提供取样信号。BSG 的制作和取样过程可以看作菲涅耳全息的记录与再现过程^[8],如图 1 和图 2 所示。基于全息分析理论,从理论上建立了 BSG 的使用状态模型,并对其在工程使用中的实际取样效果进行了分析研究。

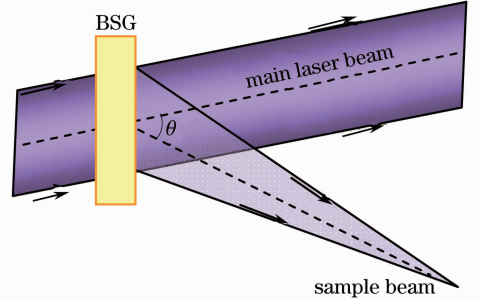


图 2 BSG 取样原理示意图

Fig. 2 Sampling theorem schematic diagram of BSG

BSG 的光栅结构取决于全息曝光过程,如图 1 所示,BSG 全息记录时的倾斜平面波与球面波可表示为

$$r(x, y) = R_o \exp(j\phi_R) m, \quad \phi_R = k_o (x \cos \alpha_R + y \cos \beta_R), \quad (1)$$

$$o(x, y) = \frac{O_o}{r} \exp(j\phi_o), \quad \phi_o = \frac{k_o}{2z_o} [(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2], \quad (2)$$

式中 $k_o = \frac{2\pi}{\lambda_o}$, λ_o 为制作 BSG 时的波长。在菲涅耳近似下,BSG 透过率函数可表示为^[9]

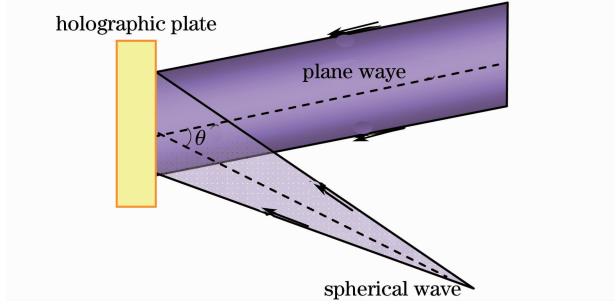


图 1 BSG 全息曝光示意图

Fig. 1 Holographic exposure schematic diagram of BSG

$$t_{HL} = \exp \left\{ j\nu \cos \left\{ \frac{k_o}{2z_o} [(x - x_o - z_o \cos \alpha_R)^2 + (y - y_o - z_o \cos \beta_R)^2] \right\} \right\}, \quad (3)$$

式中 ν 为调制幅度。利用贝塞尔函数恒等式将(3)式展开^[10]

$$t_{HL} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(\nu) \exp \left\{ -jn \frac{k_o}{2z_o} [(x - x_o - z_o \cos \alpha_R)^2 + (y - y_o - z_o \cos \beta_R)^2] \right\}, \quad (4)$$

光束取样时,入射光可看作一倾斜平面光波

$$c(x, y) = C_o \exp(j\phi_c), \quad \phi_c = k(x \cos \alpha_c + y \cos \beta_c), \quad (5)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为再现时的波长。则透过 BSG 的光场复振幅分布为

$$U_o(x, y) = C_o \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(\nu) \exp \left\{ -jn \frac{k_o}{2z_o} [(x - x_o - z_o \cos \alpha_R)^2 + (y - y_o - z_o \cos \beta_R)^2] + j\phi_c \right\}, \quad (6)$$

由(6)式, $n=0$ 时,得到主光束; $n=\pm 1$ 时,分别得到汇聚和发散光束。这里主要讨论 $n=1$ 时的汇聚光束(即取样光束),其复振幅分布为

$$U_{o1}(x, y) = C_o j J_1(\nu) \exp \left\{ -j \frac{k_o}{2z_o} [(x - x_o - z_o \cos \alpha_R)^2 + (y - y_o - z_o \cos \beta_R)^2] + \phi_c \right\}, \quad (7)$$

化简可得

$$U_{o1}(x, y) = C_1 \exp(j\phi_1), \quad \phi_1 = -\frac{k_o}{2z_o} [(x - X_o)^2 + (y - Y_o)^2], \quad X_o = x_o + z_o(\mu \cos \alpha_c + \cos \alpha_R), \quad (8)$$

$$Y_o = y_o + z_o(\mu \cos \beta_c + \cos \beta_R), \quad \mu = k/k_o = \lambda_o/\lambda,$$

式中 C_1 为常数, μ 表示记录与再现时的波长偏差, $\mu > 1$ 波长偏小, $\mu < 1$ 波长偏大。通过分析可以看出取样光束是一汇聚光束,其光斑中心坐标为 (x_1, y_1, z_1) , $x_1 = X_o, y_1 = Y_o, z_1 = \mu z_o$ 。

根据标量衍射理论^[11],在观察平面 $z = z_1(XoY)$ 处取样光斑的光场复振幅分布为

$$U(X, Y) = \frac{C_1 \exp(jkz_1)}{\lambda z_1} \exp \left[\frac{jk}{2z_1} (X^2 + Y^2) \right] \mathcal{F} \left\{ \exp(j\phi_1) \exp \left[\frac{jk}{2z_1} (x^2 + y^2) \right] \text{rect} \left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b} \right) \right\}, \quad (9)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换, a 和 b 分别代表光栅的长和宽。当照明光束 $c(x, y)$ 与 $r(x, y)$ 互为共轭时, 在观察面得到理想取样光斑的复振幅分布为

$$U(X, Y) = A \exp\left[\frac{jk_0}{2z_0}(X^2 + Y^2)\right] \text{sinc}[a(f_x - f_{x_0}), b(f_y - f_{y_0})],$$

$$A = \frac{abC_0 J_1(\nu) \exp(jk_0 z_0) \exp\left[\frac{jk_0}{2z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right]}{\lambda_0 z_0}, \quad f_x = \frac{X}{\lambda_0 z_0}, \quad f_y = \frac{Y}{\lambda_0 z_0} f_{x_0} = \frac{x_0}{\lambda_0 z_0}, \quad f_{y_0} = \frac{y_0}{\lambda_0 z_0}, \quad (10)$$

取样光斑的能量按 sinc 函数分布, 取样光斑中心位于 (x_0, y_0, z_0) 点。

如果两者不共轭, 则根据实际使用时可能存在的误差可分为 3 种情况: 入射角偏差、波长偏移和相位畸变。以下就这 3 种情况做具体分析:

1) 当存在角度偏差 $\delta\alpha, \delta\beta$ 时, 得到观察面取样光斑复振幅分布为

$$U(X, Y) = A_1 \exp\left[\frac{jk_0}{2z_0}(X^2 + Y^2)\right] \text{sinc}[a(f_x - f'_{x_0}), b(f_y - f'_{y_0})],$$

$$A_1 = \frac{abC_0 J_1(\nu) \exp(jk_0 z_0) \exp\left[\frac{jk_0}{2z_0}(X_0'^2 + Y_0'^2)\right]}{\lambda_0 z_0},$$

$$X_0' = x_0 + z_0 [\cos \alpha_R - \cos(\alpha_R + \delta\alpha)], \quad Y_0' = y_0 + z_0 [\cos \beta_R - \cos(\beta_R + \delta\beta)],$$

$$f'_{x_0} = \frac{X_0'}{\lambda_0 z_0}, \quad f'_{y_0} = \frac{Y_0'}{\lambda_0 z_0}. \quad (11)$$

2) 当存在波长偏差 ($\mu \neq 1$) 时, 观察面取样光斑复振幅分布为

$$U(X, Y) = A_2 \exp\left[\frac{jk}{2z_1}(X^2 + Y^2)\right] \text{sinc}[a(f_x - f''_{x_0}), b(f_y - f''_{y_0})],$$

$$A_2 = \frac{abC_0 J_1(\nu) \exp(jkz_1) \exp\left[\frac{jk}{2z_1}(X_0''^2 + Y_0''^2)\right]}{\lambda z_1},$$

$$X_0'' = x_0 + z_0 \cos \alpha_R (1 - \mu), \quad Y_0'' = y_0 + z_0 \cos \beta_R (1 - \mu), \quad f''_{x_0} = \frac{X_0''}{\lambda_0 z_0}, \quad f''_{y_0} = \frac{Y_0''}{\lambda_0 z_0}. \quad (12)$$

3) 当存在相位畸变 $\Delta\varphi$ 时, 观察面取样光斑复振幅分布为

$$U(X, Y) = A \exp\left[\frac{jk_0}{2z_0}(X^2 + Y^2)\right] \text{sinc}[a(f_x - f_{x_0}), b(f_y - f_{y_0})] * \mathcal{F}[\exp(j\Delta\varphi)]. \quad (13)$$

通过以上分析可知: BSG 实际使用时入射角度偏差和波长偏移主要影响取样光斑的位置, 不会改变取样点的能量分布形式。而当入射光存在相位畸变时, 取样光斑复振幅分布受到相位畸变函数的调制, 这将对光斑的形态产生较大的影响, 具体情况后面进一步详细讨论。

3 模拟计算及分析

通过分析, 获得了不同使用状态下 BSG 取样光斑位置及其能量分布的理论表达式。在此基础上, 采用数值模拟的方法, 进一步分析入射角度偏差、波长偏移和相位畸变对取样光斑的具体影响。

取 $z_0 = 4000 \text{ mm}$, $\alpha_R = 80^\circ$, $\beta_R = 90^\circ$, $\lambda = 351 \text{ nm}$; 令 y 方向无角度偏移 (即 $\delta\beta = 0$), $\delta\alpha$ 为入射角偏差, δx 和 δz 分别表示取样点沿 x, z 方向偏移量 (后面称之为横向偏移量和纵向偏移量), 相位畸变量为 $\Delta\varphi$ 。图 3 分别给

出了入射光角度偏差 $\delta\alpha$ ($-2^\circ \sim 2^\circ$), 波长偏差 μ 与 BSG 取样光斑位置、取样角 (θ) 和焦距 (f) 的关系。

分析得出以下结论: 1) 横向偏移量 δx 与角度偏差 $\delta\alpha$ 近似成线性关系且变化非常敏感, 如 $\alpha_R = 80^\circ$, $\delta\alpha = 0.5^\circ$ 时, $\delta x = 34.4023 \text{ mm}$; 另外倾斜平面波的入射角 α_R 对 δx 也有影响, 对应相同的角度偏移量, α_R 越大 δx 越大, 但影响很小; 2) 纵向偏移量 δz 随波长偏差 μ 的增大而增大, δx 随 μ 的增大而减小, 与角度偏差不同的是 μ 主要影响 δz , 对 δx 的影响较小; 3) 取样角 θ 随角度偏差 $\delta\alpha$ 增大而减小, 两者近似成线性关系, 而 $\delta\alpha$ 对取样焦距 f 的影响很小; 4) 波长偏移 μ 与 θ 及 f 近似成线性关系, 且 μ 对 f 的影响比较大。BSG 实际应用中波长偏移很小主要存在入射角度偏差, 因此取样光斑横向偏移及 BSG 取样角受影响较大, 而取样光斑纵向偏移及取样焦距变化较小。

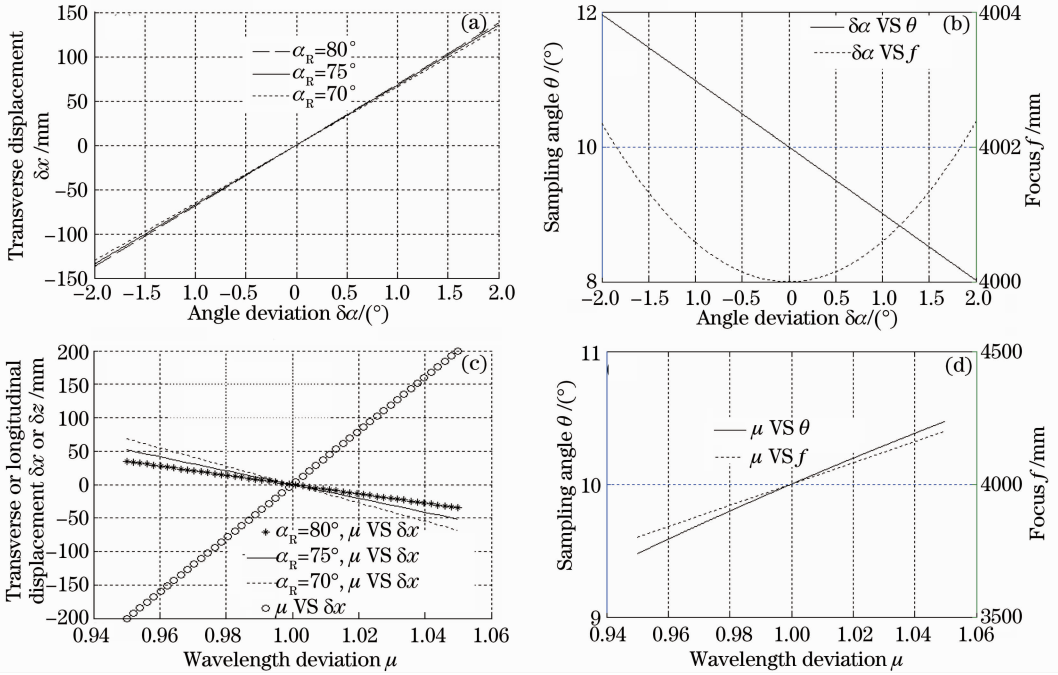


图 3 角度偏差、波长偏移对 BSG 取样效果的影响。 $\mu=1$ 时(a) $\delta\alpha$ 和 δx 的关系,(b) $\delta\alpha$ 与 θ, f 的关系;
 $\delta\alpha=0$ 时(c) μ 与 $\delta x, \delta z$ 的关系,(d) μ 与 θ, f 的关系

Fig. 3 Affection of angle deviation, wavelength deviation action on BSG's sampling effects. (a) relation between $\delta\alpha$ and δx ,
 (b) relation between $\delta\alpha$ and θ (or f) when $\mu=1$; (c) relation between μ and δx (or δz),
 (d) relation between μ and θ (or f) when $\delta\alpha=0$

根据(13)式,入射光存在相位畸变时将 对 BSG 取样光斑的形态产生影响,而其主 要取决于相位畸变函数。由于 ICF 驱动 系统的光路复杂且光学元件众多,其相 位畸变情况也比较复杂^[12,13],这里主 要考虑低频段波前畸变对 BSG 的影响。 从频域角度出发,可将 ICF 驱动器系统 波前畸变的低频段简化为随机相位屏来 处理^[14],随机相位屏的表达式为

$$\Delta\varphi(x, y) = \tau \cdot N_{\text{ran}}(-1, 1) * \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{s_{-g_x}}\right)^2 + \left(\frac{y}{s_{-g_y}}\right)^2\right]\right\}, \quad (14)$$

式中 τ 为相位起伏的标准差, $N_{\text{ran}}(-1, 1)$ 为在 -1 到 1 之间均匀分布的随机数序列, $*$ 表示卷积, s_{-g_x} 和 s_{-g_y} 分别为 x 方向和 y 方向上决定相位噪声空

间起伏的参数。

取 $s_{-g_x} = s_{-g_y} = 8 \text{ mm}$, 根据(14)式,利用 S-FFT 算法^[11]得到不同低频相位畸变量对 取样光斑分布的影响如图 4 和图 5 所示。

从图中可看出:1)入射光相位畸变主要 影响光斑的能量分布形式,相位畸变量越 大,更多能量分布在理想取样光斑周围区 域,取样光斑的尺寸变大,光束质量变差, 光斑的形状变坏;2)相位畸变 PV 值 $\tau \leq 0.0211$ 时,取样光斑分布无明显变化, 而当 $\tau > 0.0211$,光斑大小随 τ 急剧增 大,光斑形状迅速变坏。当相位畸变较大 时,光斑尺寸较大而且光斑形状变得很 差,这将给光斑的取样造成困难,容易引 起光束能量测量的不准确性。

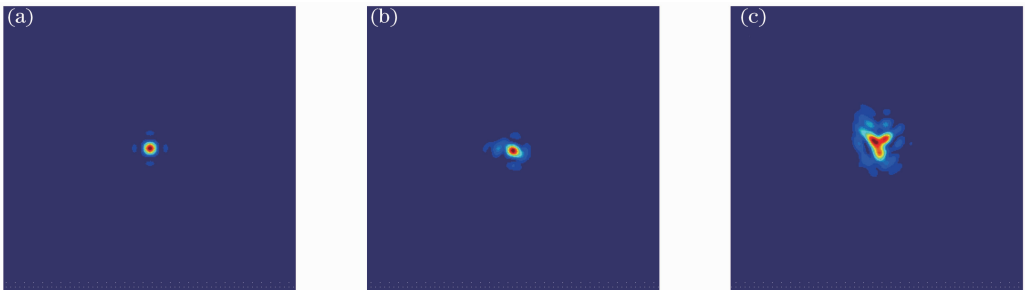


图 4 相位畸变与取样光斑分布的关系。(a) $\tau=0$;(b) $\tau=0.007$;(c) $\tau=0.014$

Fig. 4 Relation between wavelength deviation and distribution of sampling spot. (a) $\tau=0$;(b) $\tau=0.007$;(c) $\tau=0.014$

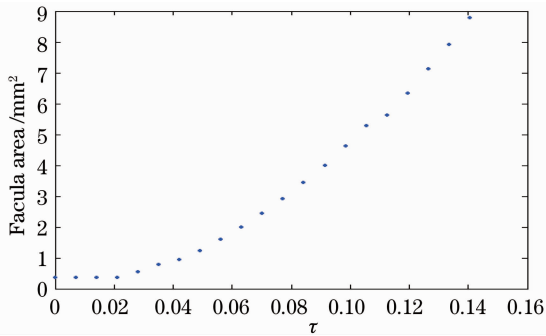


图5 取样光斑大小(占总能量95%的光斑面积)随 τ 变化关系

Fig. 5 Relation between the area of sampling spot (containing 95% of the whole energy in this area) and τ

4 结 论

针对 ICF 终端光学系统光束取样光栅的实际使用情况,基于全息记录和再现理论,建立了 BSG 使用状态模型。从理论上分析了照明光波存在入射角偏差、波长偏移、相位畸变时,对 BSG 取样光斑位置及其能量分布的影响。通过分析发现入射角偏差和波长偏移主要影响取样光斑的位置,而入射光相位畸变主要影响取样光斑的能量分布,这为 BSG 在实际使用中需要作出的调整提供了指导。ICF 驱动系统中引起取样光束波前畸变的因素很多,畸变的情况也比较复杂,本文只对低频相位畸变对 BSG 的影响做了讨论,对中高频相位畸变情况的分析有待进一步研究。

参 考 文 献

- Xie Yongjie, Liu Jingru, Zhao Xueqing. Laser beam smoothing and uniform illumination in ICF[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(6): 454~459
谢永杰,刘晶儒,赵学庆. ICF 中光束平滑及靶面辐照均匀性技术评述[J]. *激光技术*, 2001, **25**(6): 454~459
- Gao Fuhua, Zeng Yangsu, Xie Siwei *et al.*. Using E-beam directory writing methods to fabricated low-efficiency beam sampling grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 134~136
高福华,曾阳素,谢思伟等. 电子束直写制作低效取样光栅[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 134~136

- Qiao Zhanfeng, Lu Xingqiang, Zhao Dongfeng *et al.*. Arrangements design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1328~1332
乔战峰,卢兴强,赵东峰等. 神光 II 升级装置终端光学组件的排布设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1328~1332
- J. A. Britten, R. D. Boyd, M. D. Perry *et al.*. Low-efficiency gratings for third-harmonic diagnostics applications[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 121~128
- T. H. Bett, I. C. Smith. Diffractive beam samplers for large-aperture beam diagnostics[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 445~452
- S. N. Dixit, J. Britten, R. Hyde *et al.*. Fabrication and applications of large-aperture diffractive optics[C]. *SPIE*, 2001, **4440**: 101~108
- Zhang Yixiao, Yao Xin, Gao Fuhua *et al.*. Design of combined color-separation grating and beam-sampling grating element used in inertial confinement fusion driver with error-diffusion method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1788~1792
张怡霄,姚欣,高福华等. 误差扩散法设计用于惯性约束聚变驱动器的色分离光栅-光束采样光栅集成元件[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1788~1792
- Wang Bingchao, Li Liangde, Gao Wenqi *et al.*. Optics [M]. Jilin: Jilin University Press, 1991
王秉超,李良德,高文琦等. *光学*[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 1991
- Zeng Yangsu, Zhang Yixiao, Gao Fuhua *et al.*. Multiple fractional Fourier transform hologram recording with holographic lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 947~951
曾阳素,张怡霄,高福华等. 用全息途径记录多重分束傅里叶变换全息图[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 947~951
- Wang Shifan, Zhu Ziqiang. Principle of Modems Optical[M]. Chengdu: Press of Electronic Science and Technology of China, 2006. 176~177
王仕璠,朱自强. *现代光学原理*[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2006. 176~177
- Li Junchang. Diffraction and Heat Action Calculation of Laser [M]. Beijing: Science Press, 2008. 119~123
李俊昌. *激光的衍射及热作用计算*[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 119~123
- W. H. Williams, J. M. Auerbach, M. A. Henesian *et al.*. Modeling characterization of the national ignition facility focal spot [C]. *SPIE*, 1998, **3264**: 93~104
- J. T. Hunt, K. R. Manes. Hot images from obscurations[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 5973~5982
- Su Jingqin, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Simulation on the model of low frequency distorted wavefront of laser beam [J]. *High Power Laser and Particles Beams*, 2000, **12**(sl): 163~166
粟敬钦,魏晓峰,马驰等. 激光束低频畸变波前模型的计算模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(sl): 163~166