

文章编号: 0258-7025(2008)03-0383-05

有限尺寸光栅压缩器的优化设计

李朝阳¹ 戴亚平¹ 王 韬¹ 徐 光²

(¹ 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800; ² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 分析了超短超强激光系统中有限尺寸光栅压缩器设计的关键物理参数及约束条件, 得到了压缩器优化的三项基本变量。给出了一种输出能量最大化的压缩器优化方法, 进而确定了有限尺寸光栅压缩器的最大工作能力。针对传统的圆光束方案提出了改进的椭圆光束方案, 增大了聚焦能量, 减小了焦斑尺寸, 提高了峰值聚焦功率密度。通过数值模拟对 500 mm 曝光口径介质膜光栅在圆光束和椭圆光束两种方案下的最大输出能力进行分析比较, 指出单块光栅在椭圆光束方案下可以实现 500 fs, 500 J, 1 PW 的脉冲输出。

关键词 光学器件; 光栅压缩器; 拍瓦激光装置; 啁啾脉冲放大

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A

Optimal Design of Grating-Size-Limited Compressor

Li Zhaoyang¹ Dai Yaping¹ Wang Tao¹ Xu Guang²

(¹ Shanghai Institute of Laser Plasma, Chinese Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Pivotal parameters and restricted condition of the grating-size-limited compressor in an ultra-short, ultra-intense laser system are analyzed, and three basic parameters are obtained. An optimal method for compressor to output a maximal pulse energy is developed, and the maximal output pulse energy of the grating-size-limited compressor is given. Compared with the traditional circular beam method, an advanced elliptical beam method is presented, which could be used to output much higher pulse energy, a smaller spot size and a larger focal intensity. Using numerical simulation, the maximal output pulse energy of the 500 mm grating compressor based on the circular beam and the elliptical beam are calculated separately. The results show that the 500 fs, 500 J, 1 PW pulse can be obtained without using tiled grating technology if elliptical beam method is used.

Key words optical devices; grating compressor; petawatt laser facility; chirped pulse amplification

1 引 言

千焦耳级拍瓦激光装置为实现激光约束聚变创造了“快点火”^[1,2]技术途径。“快点火”前期物理实验要求: 点火驱动器输出激光的能量大于 1 kJ, 脉冲宽度在 1~10 ps 之间^[3], 而实现完全意义上的点火则需要万焦耳级的脉冲能量。在激光技术上, 啁啾脉冲放大(CPA)技术为实现高能、高峰值功率的激光输出提供了技术手段^[4,5]。然而, 压缩器光栅较低的损伤阈值和较小的物理尺寸限制了点火驱动器的输出能量。目前, 商品化介质膜光栅的损伤阈值

仅为 1.2 J/cm² 左右^[6], 最大物理尺寸为 485 mm × 335 mm, 激光系统本身较差的能量稳定性进一步限制了光栅表面的能流密度, 导致激光系统的输出能量仅为百焦耳量级; 另一方面, 由于缺乏合适的镀膜材料提升光栅损伤阈值以及制备大口径光栅存在着曝光、镀膜等工艺难题, 部分实验室采用多块光栅拼接的方法以提高输出能量^[7]。然而, 光栅拼接技术对光束特性的检测、机械结构的反馈控制及稳定性保持都提出了苛刻的要求^[8,9]。因此, 光栅压缩器的输出能力已经成为制约点火驱动器能量输出的瓶

收稿日期: 2007-06-29; 收到修改稿日期: 2007-10-29

基金项目: 国家 863 计划资助项目。

作者简介: 李朝阳(1983—), 男, 陕西人, 硕士研究生, 主要从事高功率超短脉冲激光理论方面的研究。

E-mail: zzyylee@163.com.cn

导师简介: 戴亚平(1973—), 男, 安徽人, 研究员, 主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: ypdai@mail.shnc.ac.cn

颈。依据有限尺寸的商品化光栅,实现光栅压缩器结构的最优化设计将成为点火驱动器工程设计的关键。

为了提高光栅压缩器的输出能力,本文分析了决定压缩器设计的关键物理量及其相互关系,给出了在有限光栅尺寸下的最优化设计方法;在优化设计中,发现传统的圆光束相当大程度地浪费了栅线方向的空间尺寸,提出了椭圆光束入射的技术方案;此外,还对国产500 mm曝光口径介质膜光栅在圆光束和椭圆光束两种入射方案下的输出能力进行了模拟分析。

2 压缩器优化理论模型

对于光栅压缩系统,如果脉冲压缩比越大则所要求的光栅横向尺寸就越大。尽管采用多个压缩器通过多次压缩的方式可以降低单次脉冲压缩对光栅横向尺寸的要求,但却显著降低了光栅压缩器的转换效率,并提高了系统的造价。如图1选用完全对称的两个压缩器通过两次压缩把脉宽为 t_1 的长脉冲压缩到脉宽为 t_3 的短脉冲,单次脉冲压缩量为 $\delta t = (t_1 - t_3)/2$ 。两次压缩的优点是既降低了光栅尺寸的限制,还可以完全补偿光束的空间啁啾,保证输入输出光束的空间一致性。

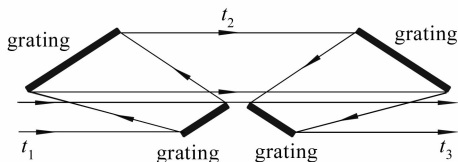


图1 压缩器结构

Fig.1 Configuration of the compressor

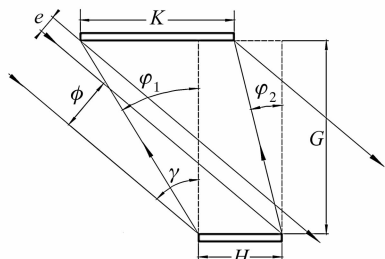


图2 压缩器参数

Fig.2 Parameters of the compressor

根据 Edmond B. Treacy^[10] 利用衍射光栅对实现脉冲压缩的原理,图2中两块光栅的垂直距离 G 满足^[11,12]

$$G = \frac{cd^2 \delta t}{\lambda_0 \delta \lambda} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{d} - \sin \gamma \right)^2 \right]^{3/2}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中光速, d 为光栅常数, λ_0 为中心波长,

$\delta \lambda$ 为脉冲带宽, γ 为入射角。若入射光束口径为 ϕ , 则第1,4块光栅横向尺寸

$$H = \frac{\phi}{\cos \gamma}. \quad (2)$$

图2由于光栅尺寸的限制,第2,3块光栅对光谱具有剪切效应,其中 $\delta \lambda_1 = \lambda_1 - \lambda_2$ 的光谱成分可以无剪切地通过压缩器,其他光谱成分则被部分剪切或完全剪切。 λ_1 和 λ_2 为第2,3块光栅两端开始发生光谱剪切现象的起始波长, $\lambda_1 > \lambda_2$ 并且关于中心波长 λ_0 对称,其对应于入射角 γ , 光栅常数 d 的一级衍射角分别为 φ_1 和 φ_2 。因此,第2,3块光栅横向尺寸

$$K(d, \gamma, \phi) = (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)G + H, \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} \sin \varphi_1 = \frac{\lambda_1}{d} - \sin \gamma \\ \sin \varphi_2 = \frac{\lambda_2}{d} - \sin \gamma \end{cases}. \quad (4)$$

可见,第2,3块光栅横向尺寸 K 是光栅常数 d , 入射角 γ 和光束口径 ϕ 的函数。实际应用中,为了避免光栅本身所引起的挡光问题,还需要考虑图2中光束与光栅间隔 e

$$e(d, \gamma, \phi) = [(\tan \gamma - \tan \varphi_1)G - H] \cos \gamma. \quad (5)$$

同样,光束与光栅间隔 e 也是光栅常数 d , 入射角 γ 和光束口径 ϕ 的函数。压缩器第1块和第4块光栅上光束投影面积最小,能流密度最高,由于压缩器的工作机制,第1块光栅上的纳秒脉冲到达第4块光栅时成为皮秒或亚皮秒脉冲。介质膜光栅损伤阈值对于纳秒脉冲约为 1.7 J/cm^2 ^[13], 而对于皮秒或亚皮秒脉冲约为 1.2 J/cm^2 , 所以第4块光栅成为压缩器设计的瓶颈。若第4块光栅对于压缩后脉冲的损伤阈值为 ρ , 为了避免光栅损伤则需要

$$\frac{E}{\pi \phi H / 4} \leq \rho, \quad (6)$$

式中 E 为第4块光栅上的脉冲能量。(6)式假定第4块光栅上能流密度分布均匀,光束在注入放大器前针对放大器进行空间整形可以保证压缩器输入光束能流密度分布均匀。尽管在压缩器中光谱剪切会造成第4块光栅上能流密度分布沿垂直栅线方向呈中心偏高两侧偏低,但影响很小,可以忽略。若第4块光栅工作在损伤阈值,脉冲能量 E 记为阈值脉冲能量 E_{th} , 根据(2),(6)式可以求出阈值脉冲能量满足

$$E_{th}(\gamma, \phi) = \frac{\rho \pi \phi^2}{4 \cos \gamma}, \quad (7)$$

可见,阈值脉冲能量 E_{th} 仅是入射角 γ 和光束口径 ϕ

的函数。

若光栅口径为 S ，则第 2,3 块光栅横向尺寸 K 不能大于 S ，根据(3) 式得

$$(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)G + H \leq S. \quad (8)$$

为了避免光栅挡光，光束与光栅间隔 e 不能小于零，根据(5) 式得

$$[(\tan\gamma - \tan\varphi_1)G - H]\cos\gamma \geq 0. \quad (9)$$

因此，(3)，(5) 和(7) 式的公共变量为光栅常数 d ，入射角 γ 和光束口径 ϕ 。那么在光栅口径 S 和损伤阈值 ρ 受限的情况下，为了实现最大脉冲能量输出而对压缩器进行的优化就是在满足(8) 式，(9) 式的条件下寻求(7) 式的最大值，即寻求最大阈值脉冲能量 E_{max} ，以及相应的最优光栅常数 d_{max} ，最优入射角 γ_{max} 和最优光束口径 ϕ_{max} 。

3 椭圆光束方案

3.1 光栅有效面积

根据图 3 在传统圆光束方案下，由于斜入射第 1 块光栅上光束投影面垂直栅线尺寸展宽，平行栅线尺寸不变，到达第 2 块光栅，衍射作用使得光束投影面垂直栅线尺寸进一步展宽，平行栅线尺寸仍然不变。即压缩过程中实际仅充分利用了光栅垂直栅线方向尺寸，平行栅线方向尺寸并没有被有效利用。若借助放大器后、压缩器前的空间滤波器对光束进行扩束，再通过椭圆孔径软边光阑将入射光束横截面从圆整形成椭圆，使其长轴 b 平行于栅线，保证椭圆长轴口径 $2b$ 不超过光栅尺寸 S 就可以大大增加光栅有效面积，提高压缩器的输出能量。固定椭圆长轴口径 $2b$ 后，椭圆光束方案下待优化的光栅压缩器

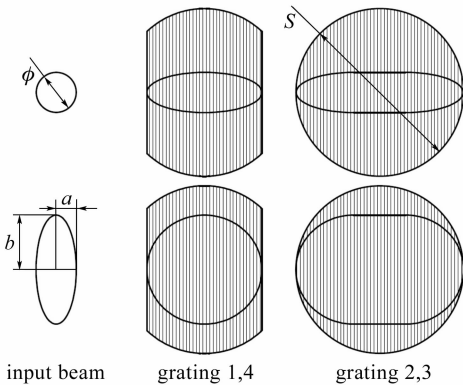


图 3 圆光束方案和椭圆光束方案下入射光束横截面及光栅有效面积

Fig. 3 Vertical section of input beam and availability areas of the gratings based on the circular/elliptical input beam

参数为光栅常数 d ，入射角 γ 和椭圆短轴口径 $2a$ 。

3.2 聚焦焦斑位置

如图 4，任意平行光轴的光线经聚焦抛物面镜反射，反射光交光轴于 F 点，即光线和光轴所在平面与抛物面镜相交所得抛物线的焦点，同时也是抛物面镜的焦点。因此任意形状有限口径光束若平行光轴入射经抛物面镜聚焦均汇聚于抛物面镜焦点 F ，即椭圆光束方案不会影响聚焦焦斑位置。

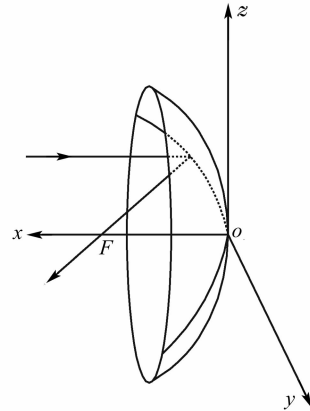


图 4 任意平行光经抛物面镜聚焦

Fig. 4 An arbitrary parallel line focused by the paraboloidal mirror

3.3 聚焦焦斑尺寸

根据衍射极限，抛物面镜聚焦焦斑尺寸满足

$$d_{dl} = \frac{1.22\lambda_0 f}{(\phi/2)}, \quad (10)$$

式中 f 为抛物面镜焦距。可见焦斑尺寸 d_{dl} 与光束口径 ϕ 成反比。如图 5，椭圆光束方案通过增加光束栅线方向口径减小了一维焦斑尺寸使得聚焦焦斑面积变小。根据文献[14]椭圆光束中央椭圆亮斑和圆光束中央圆亮斑所占能量的百分比一致(84%)，同时

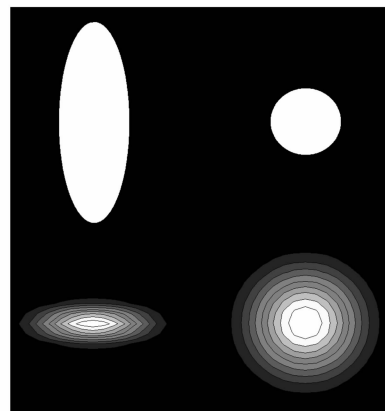


图 5 椭圆光束和圆光束对聚焦焦斑的影响

Fig. 5 Influence of the elliptical/circular input beam on the focal spot

椭圆光束方案增加了输出能量,因此椭圆光束方案提高了峰值聚焦功率密度利于“快点火”实验的实现。尽管椭圆光束方案下聚焦焦斑为椭圆,但根据文献[3]“快点火”实验对快点火驱动器聚焦焦斑形状没有要求。

4 数值模拟

若选取 $\delta\lambda = 4 \text{ nm}$, $\lambda_0 = 1053 \text{ nm}$, $t_1 = 3 \text{ ns}$, $t_3 = 500 \text{ fs}$, $\rho = 0.9 \text{ J/cm}^2$, 且 $\delta\lambda_1 = \delta\lambda$, 即一倍带宽的光谱成分无剪切地通过压缩器。当 $d = 1/1740 \text{ mm}$ 时, 第 2, 3 块光栅横向尺寸 K 随入射角 γ 和光束口径 ϕ 的变化关系如图 6 所示, 可知 γ 越小 K 越小, ϕ 越小 K 越小; 光束与光栅间隔 e 随入射角 γ 和光束口径 ϕ 的变化关系如图 7 所示, 可知 γ 越大 e 越大, ϕ 越小 e 越大。若光栅口径 $S = 500 \text{ mm}$, (8) 和 (9) 式均达到临界状态, 根据图 6, 7, 为了保证 $e > 0$ 和 $K < S$, 入射角 γ 和光束口径 ϕ 的取值范围只能在图 8 中虚线和实线以下的公共区域。

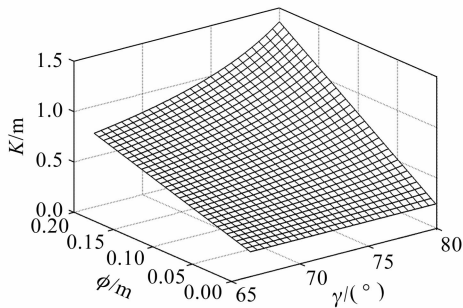


图 6 第 2, 3 块光栅横向尺寸 K 随入射角 γ 和光束口径 ϕ 的变化
Fig. 6 Size of the second or the third grating with the varying of incident angle and aperture of input beam

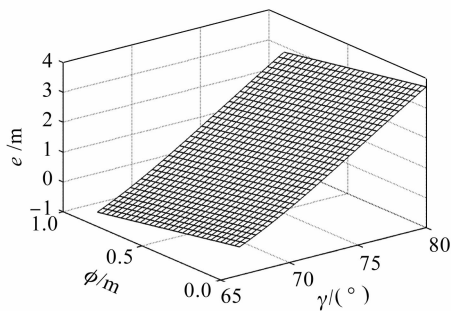


图 7 光束与光栅间隔 e 随入射角 γ 和光束口径 ϕ 的变化
Fig. 7 Free space between beam and grating with the variation of angle of incidence and aperture of input beam

圆光束阈值脉冲能量 E_{th} 随入射角 γ 和光束口径 ϕ 的变化关系如图 9 所示, 可见 γ 越大 E_{th} 越大, ϕ

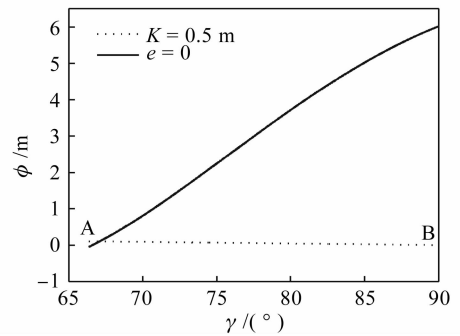


图 8 光束口径 ϕ 随入射角 γ 的变化曲线
Fig. 8 Aperture of input beam ϕ versus incident angle γ

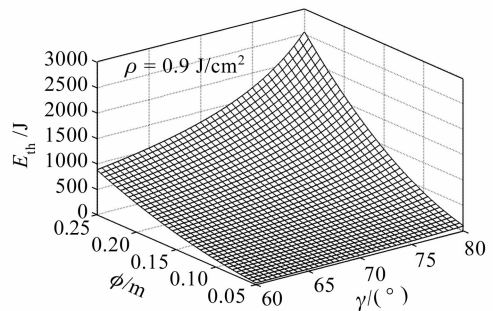


图 9 阈值脉冲能量 E_{th} 随入射角 γ 和光束口径 ϕ 的变化
Fig. 9 Threshold pulse energy E_{th} with the variation of incident angle γ and aperture of input beam ϕ

越大 E_{th} 越大。因此, 图 8 中虚线 AB 段上存在一点 $(\gamma_{max}, \phi_{max})$ 使得阈值脉冲能量 E_{th} 取得最大值 E_{max} 。若对不同光栅常数 d 进行同样的重复计算, 最终可以得到有限尺寸光栅压缩器能够输出的最大阈值脉冲能量 E_{max} , 并获得相应的最优光栅常数 d_{max} , 最优入射角 γ_{max} 和最优光束口径 ϕ_{max} 。

圆光束方案优化结果为: $E_{max} = 204 \text{ J}$, $d_{max} = 1/1585 \text{ mm}$, $\gamma_{max} = 57^\circ$, $\phi_{max} = 125.4 \text{ mm}$; 固定椭圆长轴口径 $2b = 400 \text{ mm}$; 椭圆光束方案优化结果为: $E_{max} = 737 \text{ J}$, $d_{max} = 1/1790 \text{ mm}$, $\gamma_{max} = 71.6^\circ$, $2a_{max} = 82.3 \text{ mm}$ 。如果忽略光栅衍射效率和其他损耗, 圆光束方案输出功率为 0.4 PW , 椭圆光束方案输出功率为 1.474 PW 。现有介质膜光栅在利特罗角附近一级衍射效率可高达 95% 以上, 当高斯脉冲一倍带宽完全通过压缩器 ($\delta\lambda_1 = \delta\lambda$) 时, 由于压缩器光谱剪切为软剪切, 其对输出能量的影响仅为 0.5% 左右, 因此椭圆光束方案具有输出 1 PW 的能力。

5 结 论

通过对光栅压缩器物理参数的理论分析, 并结合工程设计中的约束条件, 提出了针对光栅常数、入射角和光束口径的压缩器优化方法, 实现了在光栅

尺寸和损伤阈值受限条件下获得最大脉冲能量输出。针对国产口径500 mm,损伤阈值 0.9 J/cm^2 的介质膜光栅,模拟分析了采用圆光束和椭圆光束两种入射方案下的输出能力,给出了各自的最大输出能量、最优光栅常数、最优入射角和最优光束口径。计算结果表明,椭圆光束方案具备输出500 J的能力,而当采用氧化硅介质膜光栅时,损伤阈值进一步提升,光栅工作在能流密度 1.2 J/cm^2 时,光栅压缩器将可以输出1 kJ。同样,对于长宽比约为4:3的商品化长方形光栅,采用长方形光束入射将可以更加有效地利用光栅面积,提高系统的工作能力。

参 考 文 献

- 1 M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5):1626~1634
- 2 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):865~872
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(2)[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):865~872
- 3 Zhang Jiatai, He Bin, He Xiantu *et al.*. Study on the mechanism of the fast ignition in laser fusion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(5):921~925
张家泰,何斌,贺贤士等. 激光聚变快点火机理研究[J]. 物理学报, 2001, **50**(5):921~925
- 4 P. Maine, D. Strickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(2):398~403
- 5 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):721~729
- 6 A. Cotel, N. Forget, C. Brach *et al.*. Characterisation of multilayer dielectric gratings for petawatt-class lasers [C]. OSA, *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2005, **3**:2038~2040
- 7 Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester. Demonstration of real-time, phase-locked alignment of tiled gratings for chirped-pulse-amplified lasers [R]. *LLE Review*, 2005, **100**:242~251
- 8 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Effect of tiling gratings errors on laser beam spatial distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):161~165
马雪梅,戴亚平,朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(2):161~165
- 9 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Temporal property of tiled grating compressor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):701~705
马雪梅,戴亚平,朱健强. 拼接光栅压缩器的时域特性[J]. 光学学报, 2007, **27**(4):701~705
- 10 Edmond B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9):454~458
- 11 Xu Guang, Qian Liejia, Fan Dianyuan. Optimization of the single grating stretcher in chirped pulse amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12):1067~1070
徐光,钱列加,范滇元. 啁啾脉冲放大系统中单光栅展宽器的优化[J]. 中国激光, 2002, **A29**(12):1067~1070
- 12 J. D. McMullen. Analysis of compression of frequency chirped optical pulses by a strongly dispersive grating pair [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(5):737~741
- 13 Weijin Kong, Shijie Liu, Jian Shen *et al.*. Study on LIDT of MDGs for different fabrication processes [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **83**(4-9):1426~1429
- 14 Xu Yongxiang. Analysis of Fraunhofer's diffraction by elliptical aperture [J]. *Journal of Information Engineering Institute*, 1997, **16**(4):29~33
徐永祥. 椭圆孔夫朗和费衍射的分析[J]. 信息工程学院学报, 1997, **16**(4):29~33