

# 应用于准分子激光波面整形的二元光学元件的设计

刘 勋 陈 涛 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

**摘要** 设计了一种应用于 KrF 准分子激光波面整形的二元光学元件(BOE), 实现了将波面整形变换为巴特沃斯(Butternorth)分布。采用盖师贝格-撒克斯通(Gerchberg-Saxton, GS)算法实现优化设计, 使用 MATLAB 软件模拟入射和出射光场。通过对比迭代次数分别为 10、100 和 1000 次的模拟结果, 研究盖师贝格-撒克斯通算法中迭代次数对整形效果的影响。模拟出迭代次数为  $10^6$  次的整形结果, 并且得到二元光学元件的相位分布。模拟结果表明, 出射光场呈巴特沃斯分布, 实现了波面整形, 矩形光斑能量占总能量的 75.62%, 能量的利用率较高, 其均匀性的均方根(RMS)误差为 0.1394%。

**关键词** 激光技术; 准分子激光; 波面整形; 巴特沃斯分布; 盖师贝格-撒克斯通算法

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## Design of Binary Optical Element Applied in Excimer Laser Wavefront Shaping

Liu Xun Chen Tao Zuo Tiechuan

(National Center of Laser Technology, College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** We designed a binary optic element (BOE) applying in the excimer laser wavefront shaping, which can obtain an optical field of Butterworth distribution. We employed the Gerchberg-Saxton (GS) algorithm for realizing the optimization and MATLAB was utilized to simulate the change of optical field. By comparing the simulation results of iterative number with 10, 100 and 1000 respectively, we studied the impacts of iterative number on shaping effects in Gerchberg-Saxton algorithm. Through the shaping result by simulating about  $10^6$  time's iterations, the phase distribution of binary optic element was obtained. The results present that the distribution of emergent optic field is Butterworth whose energy is 75.62% of total energy and the root mean square (RMS) of uniformity is 0.1394%.

**Key words** laser technique; excimer laser; wavefront shaping; Butterworth distribution; Gerchberg-Saxton algorithm

### 1 引 言

二元光学元件(BOE)在实现光波变换上具有许多显著的、传统光学不具备的功能, 在理论上可以获得任何设定光波波面, 具有很高的衍射效率。二元光学元件与传统的光学元件结合, 可使系统更为简洁, 并能矫正系统像差等。

准分子激光器发出波长为 351~193 nm 的紫外光脉冲, 是一种适用于微加工的紫外波段的短波长强光源, 单光子能量高, 在微机械加工、医学、光通

信中具有重要应用。但由于准分子激光固有的特性, 其光束质量较低, 属于多模高斯光束, 光束能量具有不均匀性, 从而其应用受到极大制约。近年来, 关于准分子激光波面整形和光束能量均匀化方面, 人们进行了大量的理论和实验研究<sup>[1~3]</sup>。

本文利用 MATLAB 软件, 采用盖师贝格-撒克斯通(Gerchberg-Saxton, GS)算法, 设计用于波面整形的二元光学元件, 实现光波振幅分布近似为巴特沃斯(Butternorth)分布(近矩形分布), 并进行仿真模拟。

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50335050)和北京市属市管高等学校人才强教计划资助课题。

**作者简介:** 刘 勋(1982-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事激光微加工光学系统的设计、激光微加工试验与新方法等方面的研究。E-mail: s200513002@emails.bjpu.edu.cn

**导师简介:** 左铁钊(1941-), 女, 辽宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事特种材料的激光加工、激光加工的理论、技术与系统、激光微技术等方面的研究。E-mail: ncltzu@bjut.edu.cn

## 2 理论依据和设计原理

根据基尔霍夫衍射理论,在傍轴近似下,光学系统可看成是一种输入与输出的变换问题。无论是菲涅耳衍射区,还是夫琅禾费衍射区,均可认为是一种空间线性变换系统。

以傅里叶变换光学系统为例,任何一个输入场  $E(x, y)$ , 可以通过对其进行振幅、相位调制获得任意的输出场分布  $E'(x', y')$ , 振幅调制函数和相位调制函数分别为  $|\mathcal{F}^{-1}\{E'(x', y')\}|/f(x, y)$ ,  $\arg\{\mathcal{F}^{-1}[E'(x', y')]\} - \phi(x, y)$ , 其中  $\arg$  为求解复数幅角的函数符号,  $\mathcal{F}^{-1}$  为逆傅里叶变换,  $\phi(x, y)$  为相位分布函数<sup>[4]</sup>。

实际应用中,一般仅考虑输出面的光强分布,故利用二元光学器件实现波面整形这一问题可归结为:利用具有相位分布函数  $\phi(x, y)$  (透过率函数为  $\exp[i\phi(x, y)]$ ) 的二元光学器件调制输入场  $E(x, y)$ , 使其经变换后得到所需的输出场  $E'(x', y')$ 。

二元光学元件是一个相位调制元件,它可以把输入的平行激光束进行菲涅耳变换到平面上,平面上的光场分布就是输入光场分布的菲涅耳频谱。在二元光学中这个光场的振幅分布就是所求的量。为方便设计,将二元光学元件看作是平面上光场分布的傅里叶频谱,并只有相位分布。这样当平行激光束经二元光学元件调制后,光束的振幅分布仍保持在  $x$  方向呈高帽型分布,在  $y$  方向近似呈高斯分布,而相位分布变为二元光学元件的相位分布。紧贴二元光学元件放置透镜,就能完成傅里叶变换,使平面上的光场分布成为调制后光场分布的傅里叶频

谱。二元光学元件对准分子激光光束的变换如图 1 所示。

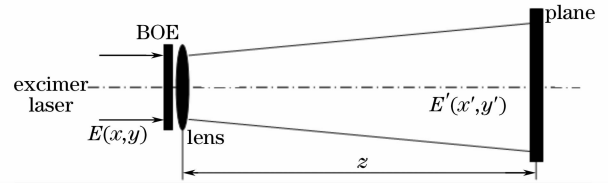


图 1 二元光学元件对光束的变换

Fig. 1 Transformation of light beam by BOE

先设平面上的光场分布的振幅为巴特沃斯分布<sup>[5]</sup>, 相位为零,作逆傅里叶变换到二元光学元件所在平面,

$$E(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E'(x', y') \exp[i2\pi(x'x + y'y)] dx' dy', \quad (1)$$

式中  $E(x, y)$  和  $E'(x', y')$  分别为变换前后的激光场分布函数。由(1)式得

$$E(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)], \quad (2)$$

式中  $a(x, y)$  为原始的振幅分布。(2)式保留相位分布,将振幅分布替换为高斯分布  $a(x, y) = \exp[-a^*(x^2 + y^2)]$ , 再作傅里叶变换到平面,

$$E'(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} E(x, y) \exp[-i2\pi(x'x + y'y)] dx dy. \quad (3)$$

保留(3)式中的相位分布,将振幅分布替换为矩形(均匀)分布,再作逆傅里叶变换到二元光学元件所在平面;这样反复迭代多次,直到收敛为止<sup>[6]</sup>。流程图如图 2 所示。

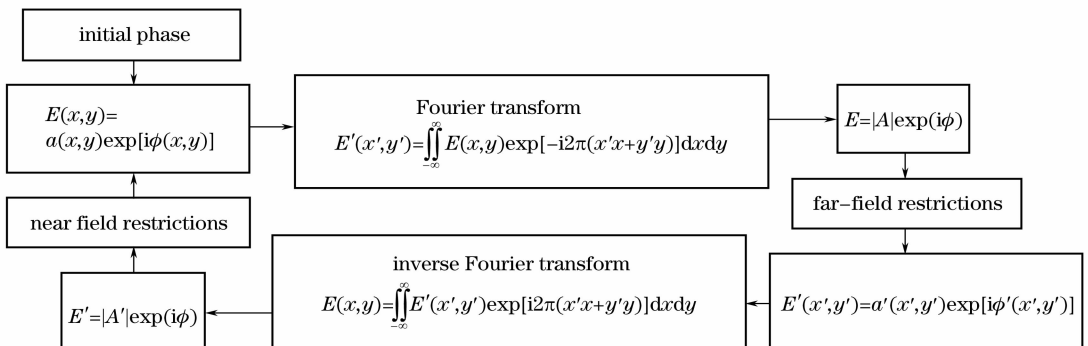


图 2 GS 算法流程示意图

Fig. 2 Flow schematic of GS algorithm

## 3 GS 算法

二元光学元件的设计类似于光学变换系统中的相位恢复问题,即已知成像系统中入射场和输出平

面上的光场分布,计算输入平面上相位调制元件的相位分布,使得经过其调制的入射波场能高精度地给出预期输出图样,实现所需功能。基于这一思想

的优化设计方法有 GS 算法、杨顾 (YG) 算法、模拟退火 (SA) 算法等<sup>[7]</sup>。

GS 算法是一种常见的相位恢复优化算法, 它的每一次循环均由四个基本步骤组成: 首先以初始相位和已知输入面光场的振幅分布开始, 做傅里叶变换; 接着引入输出面 (远场) 限制条件, 即已知或者要求的振幅分布取代原振幅分布, 同时保持相位不变; 然后做逆傅里叶变换, 对结果作输入面 (近场) 光场限制, 即以已知输入光场振幅分布取代其振幅部分, 仍保持相位不变, 再做傅里叶变换, 如此循环直至结果满意<sup>[8,9]</sup>。

## 4 分析与讨论

本文使用 Lambda Physik LPX 305iF 型准分子激光器, 工作气体为 KrF, 波长 248 nm。准分子激光的原始光斑的形状为矩形, 尺寸在  $x$  方向为

36 mm,  $y$  方向为 16 mm; 光斑能量分布在  $x$  方向近似呈高帽型分布, 在  $y$  方向近似呈高斯分布, 如图 3。其中, 图 3(a) 为变换前的人射光波的振幅分布图, 其振幅最大值被归一化地定义为 1; 图 3(b) 为它的能量分布图, 从图中可见未经过调制的光斑能量分布的均匀性非常差。

应用 MATLAB 软件模拟程序, 二元光学元件取值为 50 mm, 模拟距离入射波面 1000 mm 处出射波面的振幅分布图和波面整形二元光学元件的相位分布图<sup>[10]</sup>。为了研究拟程序的迭代次数对设计结果的影响, 将 10, 100 和 1000 次迭代的波面效果图进行对比, 如图 4 所示。由图 4 可见, 模拟程序迭代次数的增加会明显改善波面的整形效果, 经 1000 次迭代后, 波面已经基本成为巴特沃斯分布, 整形区域内能量分布的均匀性较好, 能量的利用率较高。

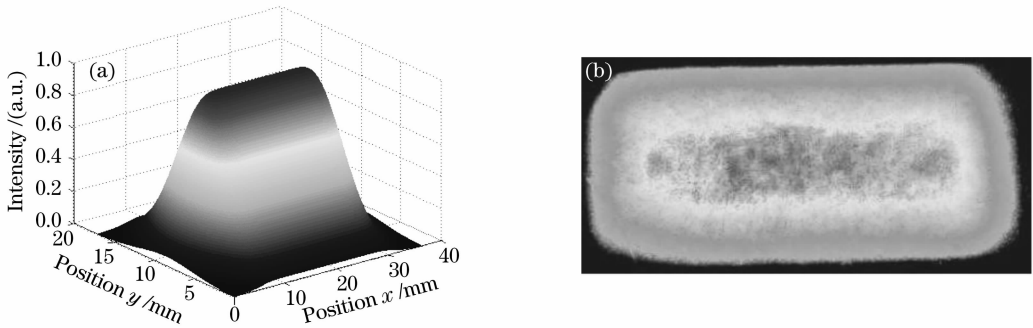


图 3 原始光斑的振幅分布 (a) 和能量分布图 (b)

Fig. 3 Amplitude distribution (a) and energy distribution (b) of original spot

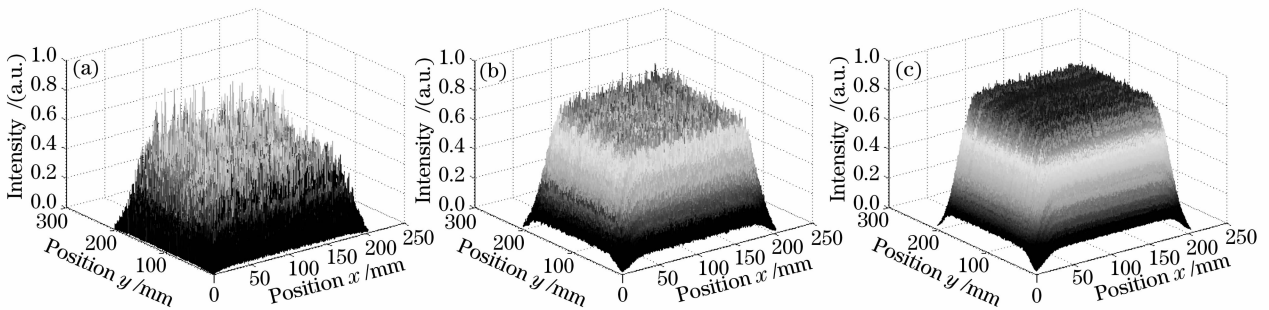


图 4 模拟的振幅分布。(a) 10 次, (b) 100 次, (c) 1000 次

Fig. 4 Simulative amplitude distribution. (a) 10 times, (b) 100 times, (c) 1000 times

图 5 为应用模拟程序经过  $10^6$  次迭代后的审计结果。图 5(a) 为出射光波的振幅分布图, 可以看出, 已实现了近似矩形的振幅分布, 图 5(b) 为二元光学元件的相位分布情况。

对图 5 模拟结果的  $x$  方向和  $y$  方向分别作出能量分布图, 如图 6。从图中可以看出, 利用 GS 算法得到的振幅分布边缘效果较好。从图 6(c) 可见, 中

央红色部分的光斑中能量较高, 由橙色、黄色至绿色逐渐降低, 边缘蓝色部分的能量较低。

经过计算, 矩形光斑的能量占总能量的 75.62%, 较高地实现了对光斑能量的利用。对于得到的矩形光斑, 其上均匀性的均方根 (RMS) 误差为

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N (|g'_i| - |g_i|)^2}{\left(\sum_{i=1}^N |g'_i|^2\right)}, \quad (4)$$

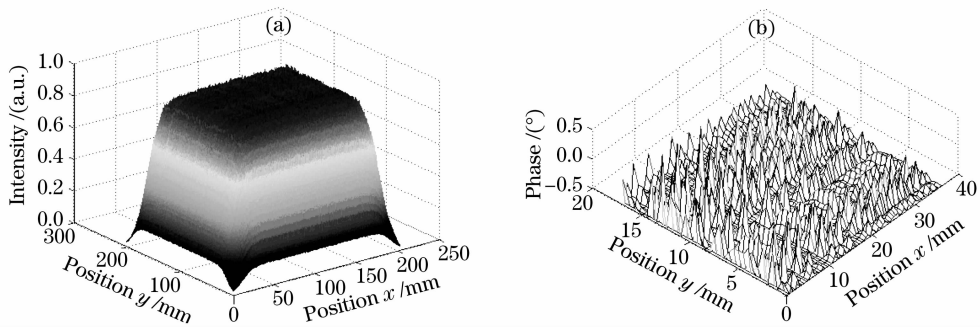


图 5  $10^6$  次迭代后的模拟结果。(a) 振幅分布, (b) 相位分布

Fig. 5 Simulative results after  $10^6$  times iterative operation (a) amplitude distribution, (b) phase distribution

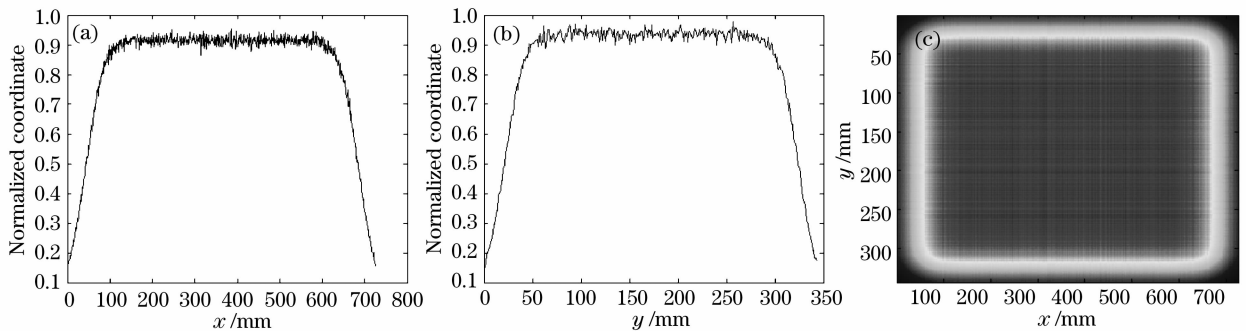


图 6 能量分布图。(a)  $x$  方向, (b)  $y$  方向, (c) 全波面

Fig. 6 Graph of energy distribution. (a)  $x$  direction, (b)  $y$  direction, (c) whole wave surface

式中,  $i=1, \dots, N$  为矩形光斑上  $N$  个取样点的序号;  $|g|$  为矩形振幅的平均值。由(4)式得到的均匀性的均方根误差  $D=0.1394\%$ 。

## 5 结 论

设计了应用于 248 nm 准分子激光波面整形的二元光学元件, 使用基于 MATLAB 软件的 GS 算法实现了光波振幅的巴特沃斯分布(近矩形分布)。通过对比迭代次数分别为 10, 100 和 1000 次的模拟结果表明, 迭代次数的增加会明显改善波面的整形效果。迭代次数为  $10^6$  次的模拟结果表明, 出射光场呈巴特沃斯分布, 矩形光斑能量利用率达 75.62%, 其均匀性的均方根误差为 0.1394%。

## 参 考 文 献

- Dong Jinxing, Ye Zhenhuan, Gao Hongyi *et al.*. Improvement of the intensity homogeneity of excimer laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(12): 894~896  
董景星, 叶震寰, 高鸿奕 等. 改善准分子激光光强分布的一种方法[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(12): 894~896
- Li Chengde, Chen Tao, Zuo Tiechuan. Design of fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6): 560~564  
李呈德, 陈涛, 左铁钊. 两级复眼式准分子激光微加工均束器的设计[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(6): 560~564
- Du Guojun, Chen Tao, Zuo Tiechuan. Lens array homogenizer for excimer laser [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2005, **16**(3): 279~281

- 杜国军, 陈涛, 左铁钊. 应用于准分子激光的透镜阵列均束器 [J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(3): 279~281
- Jin Guofan, Tan Qiaofeng, Yan Yingbai *et al.*. Binary optics used in high power laser shaping [J]. *Engineering Science*, 2000, **2**(6): 27~32, 39  
金国藩, 谭峭峰, 严瑛白 等. 二元光学在强激光波面整形中的应用 [J]. *中国工程科学*, 2000, **2**(6): 27~32, 39
- Li Zhongshe. The design of Butterworth lowpass filter based on MATLAB [J]. *Information Technology*, 2003, **27**(3): 49~50, 52  
李钟慎. 基于 MATLAB 设计巴特沃斯低通滤波器 [J]. *信息技术*, 2003, **27**(3): 49~50, 52
- Wang Yongying, Wang Yurong, Yang Yongbin. Optical hierarchical image encryption by use of iterative Fourier transform algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1360~1364  
王永瑛, 王玉荣, 杨永斌. 用迭代傅里叶变换算法实现光学分级图像加密 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1360~1364
- Jin Guofan, Tan Qiaofeng. Binary optics [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2001, **14**(5): 1~10  
金国藩, 谭峭峰. 二元光学 [J]. *光电子技术与信息*, 2001, **14**(5): 1~10
- Liu Bohan, Wu Liying, Zhang Jian. Fast phases retrieval for diffraction optical devices optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 219~224  
刘伯哈, 吴丽莹, 张健. 一种用于衍射光元件优化设计的快速算法的研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 219~224
- Zeng Fa, Tan Qiaofeng, Wei Xiaofeng *et al.*. Complex optical field retrieved from intensity distributions on several fractional Fourier transform plane [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1621~1625  
曾发, 谭峭峰, 魏晓峰 等. 基于多个分数阶次的复杂光场相位恢复算法 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1621~1625
- Liu Weiguo, Chen Zhaoping, Zhang Ying. MATLAB: Programming Design and Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 80~86, 139~141  
刘卫国, 陈昭平, 张颖. MATLAB 程序设计与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 80~86, 139~141