

提高激光束整形质量的新方法

于晓晨 胡家升 王连宝

(大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 从设计优化算法和拟合方法两方面,研究了提高二元光学元件(BOE)激光束整形性能的方法。利用盖师贝格-萨克斯通(GS)算法和平滑修正法相结合的混合算法以及改进的平滑修正法,在保持顶部均匀性的前提下提高了能量转换效率,在极坐标下得到了高质量的均匀圆光束和空心环形光束输出。研究了元件半径、采样点数和初始半径与拟合精度之间的关系。在 Zemax 中得到了合理的 BOE 相位结构,输出光束满足设计要求。

关键词 光学设计;二元光学元件;激光束整形;平滑修正法;相位拟合

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0116002

New Methods for Improving the Quality of Laser Beam Shaping

Yu Xiaochen Hu Jiasheng Wang Lianbao

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The quality of laser beam shaping is improved using binary optics element (BOE) in two ways: design algorithm and phase fitting method. In polar coordinates system, high quality flat-top beam is obtained by using profile-smoothing and Gerchberg-Saxton (GS) hybrid algorithm. In order to get annular output beam, an improved profile-smoothing algorithm is presented. These two algorithms can maintain high energy conversion efficiency without loss in uniformity. Besides, we research how the radius of BOE, sampling number and initial radius influence the phase fitting accuracy. The machinable BOE phase is obtained in Zemax. The evaluation index shows that the phase structure meets the design requirements.

Key words optical design; binary optics element; laser beam shaping; profile-smoothing algorithm; phase fitting

OCIS codes 220.4830; 140.3300; 050.1380; 220.4000

1 引言

激光自 20 世纪 60 年代问世以来,在国民经济、军事、科研等领域获得了广泛应用。然而,激光束光强呈高斯分布的特点限制了它的应用范围,多数实际应用需要光强分布为均匀平顶、空心环状或其他特定形状的激光束,所以必须对激光束进行整形。目前,激光束整形元件主要有双折射透镜^[1]、液晶空间光调制器^[2]、非球面系统^[3]、二元光学元件(BOE)^[4]等。在上述诸多激光整形元件中,BOE 衍射效率高、集成性好、可实现任意波前变换,适合应用于激光束整形。

目前,BOE 光束整形中广泛使用的优化算法主要有盖师贝格-萨克斯通(GS)算法^[5]、YG 算法^[6]、模拟退火法^[7]和遗传算法^[8]等,但利用这些优化算法整形得到的输出光束无法同时具备高衍射效率、低顶部不均匀度及低均方误差等优点。本文提出了平滑修正法与 GS 算法相结合的混合算法,得到高质量的平顶光束输出;同时对平滑修正法本身进行了改进,得到了高质量的空心环状光束。

利用优化算法计算得出的相位结构虽然精确,但在工艺上难以实现。本文基于菲涅耳波带片环带公式,分析了拟合过程中采样点数、元件初始半径和

收稿日期: 2011-09-13; **收到修改稿日期:** 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(60877003)和辽宁省高校重点实验室资助项目(LS2010037)资助课题。

作者简介: 于晓晨(1986—),女,博士研究生,主要从事激光光束整形技术方面的研究。

E-mail: dorothy_yu526@126.com

导师简介: 胡家升(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事工程光学、成像科学与图象处理、光学系统设计、信息安全与防伪技术、X 射线成像技术等方面的研究。E-mail: jshu@dlut.edu.cn(中国光学学会会员号: s040420494s)(通信联系人)

口径对拟合精度的影响,确定最佳初始半径和采样点数,得到 BOE 衍射系数。在 Zemax 光学设计软件中,获得了与 Matlab 模拟结果吻合的可加工 BOE 相位结构,输出圆光束光强分布均匀。

2 设计原理

BOE 的设计可以看做一个优化问题:已知输入光束和输出目标光束,要构造一个变换函数使实际输出光束尽可能逼近所要求的输出光束。光束整形质量的主要评价指标有能量集中度 η 、均方误差 e 和顶部不均匀度 σ 等,分别定义为^[9]

$$\eta = \frac{\sum_{(x,y) \in W} I(x,y)}{\sum_{(x,y)} I(x,y)}, \quad (1)$$

$$e = \frac{\sum_{(x,y)} |I(x,y) - I'(x,y)|^2}{\sum_{(x,y)} |I'(x,y)|^2}, \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{(x,y) \in W} \left[\frac{I(x,y) - \Gamma}{\Gamma} \right]^2}{(n-1)}}, \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{\sum_{(x,y) \in W} |I(x,y)|}{n}, \quad (4)$$

其中 W 为输出面上光强均匀分布范围, n 为 W 内点数, $I(x,y)$ 为实际输出光强, $I'(x,y)$ 为理想输出光强。

由于输入输出光束都是圆对称光束,在极坐标下求取相位函数,仅需在任意半径上对振幅进行优化,这样会极大地减小运算量^[10]。本文 BOE 设计都在菲涅耳域进行,极坐标下菲涅耳变换可用带有附加相位的傅里叶变换表示,一维正反变换公式为

$$U(R) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(jk \frac{R^2}{2z}\right) F\left[u(r) \exp\left(jk \frac{r^2}{2z}\right)\right], \quad (5)$$

$$u(r) = \exp\left(-jk \frac{r^2}{2z}\right) F^{-1}\left[\frac{j\lambda z}{\exp(jkz)} U(R) \exp\left(-jk \frac{R^2}{2z}\right)\right], \quad (6)$$

式中 z 为衍射距离, $U(R)$, $u(r)$ 分别为输入、输出光场分布。

3 算法描述与模拟

3.1 原始算法

3.1.1 GS 算法

GS 算法流程可表示为

$$f = A \exp(i\phi), \quad (7)$$

$$F = T_F(f) = |F| \exp(i\phi), \quad (8)$$

$$F' = B \exp(i\phi), \quad (9)$$

$$f' = T_F^{-1}(F') = |f'| \exp(i\phi), \quad (10)$$

式中 A 为实际输入光场, B 为理想输出光场, T_F 表示菲涅耳变换。通过不断的菲涅耳和逆菲涅耳变换,使实际输出 $|F|$ 逼近理想输出 B , 此时得到的相位 ϕ 即为 BOE 相位。GS 算法简单高效,易于编程,应用广泛;但算法输出整形光束顶部不均匀度较大,要得到高质量的整形光束,需对其进行改进。

3.1.2 平滑修正法

林勇等^[11]提出用平滑修正法,实质是对 GS 算法第 3 步进行修正,光强均匀分布范围内,只有与平均光强差值大于阈值 k 的点用理想输出 B 代替,其余点保持不变,大幅减小了顶部不均匀度,但输出光束的均方误差增大,能量集中度降低。平滑修正法的基本思想为^[11]

$$\tilde{F} = \begin{cases} B \exp(i\phi), & \|F_{in} - \overline{F_{in}}\| > k \\ |\overline{F}| \exp(i\phi), & \text{else} \end{cases}. \quad (11)$$

为改善平滑修正法的缺陷,对该算法进行了改进,提出了平滑修正法与 GS 算法相结合的混合算法以及改进的平滑修正法。下面分别介绍这两种算法。

3.2 混合算法

GS 算法输出光束能量集中度好,均方误差小;平滑修正法输出光束顶部均匀性好,考虑将二者结合起来,称为混合算法。混合算法先进行平滑修正法若干次迭代收敛,再将此时得到的相位作为 GS 算法的初始相位,代入 GS 算法进行迭代,将能量重新集中,提高能量集中度。下面用 Matlab 软件模拟混合算法。

以 DH-HN1200 型 He-Ne 激光器为例,波长 $0.6328 \mu\text{m}$,束腰半径 0.55 mm ,经扩束 10 倍后入

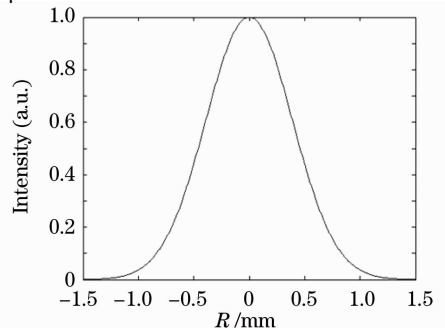


图 1 输入输出光束截面

Fig. 1 Section of input beam

射。要得到半径为 5.5 mm 的均匀圆光束输出，BOE 半径为 5.5 mm，输入输出面采样点数为 200×200 。输入高斯光束可表示为

$$A(r) = \exp(-r^2/\omega^2), \quad (12)$$

式中 ω 为束腰半径，根据能量守恒定律，得到输出面振幅系数 $g=0.774$ 。

分别使用平滑修正法以及混合算法对输入光束整形，BOE 面上接收到的输入高斯光束如图 1 所示，得到的输出光束截面图如图 2(a)、(b)所示。输

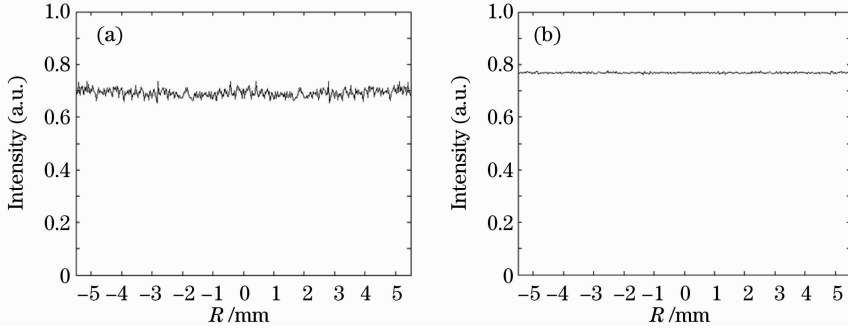


图 2 输出光束截面。(a)平滑修正法输出光束截面；(b)混合算法输出光束截面
Fig.2 Section of output beam. (a) Output section of profile-smoothing algorithm;
(b) output section of hybrid algorithm

3.3 改进的平滑修正法

随着激光技术的发展及其应用领域的扩展，需要得到中心光强为零的空心环状激光束作为激光导管、激光镊子及光学扳手等，以实现对其微观粒子的精确操纵及控制^[12]。产生空心光束的方法，目前主要有几何光学法、中空光纤法、光学全息法、模式变换法等，本文采用 BOE 将输入高斯光束变换为空心环状光束。由于空心环状光束要求中央空心区能量低且均匀性好，同时保证边缘平顶区域光束质量，平滑修正法和混合算法都难以做到，本文提出了改进的平滑修正法：

出光束质量评价指标见表 1，可以看出混合算法输出光束质量全面优于平滑修正法，是一种有效的光束整形算法。

表 1 平滑修正法与混合算法评价指标

Table 1 Evaluation indices of profile-smoothing algorithm and hybrid algorithm

	η	σ	e
Profile-smoothing algorithm / %	90.4	0.062	0.2
Hybrid algorithm / %	98.6	0.006	0.0053

$$\tilde{F} = \begin{cases} B \exp(i\phi), & \|F_{in} - \overline{F_{in}}\| > k_1 \\ B \exp(i\phi), & \|F_{out} - \overline{F_{out}}\| > k_2 \\ |\overline{F}| \exp(i\phi), & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

改进的平滑修正法用(13)式约束光强，在中央空心区域和边缘平顶区域分别设置阈值 k_1, k_2 ，同时均匀空心区和平顶区的光强。阈值 k_1, k_2 需要遍历取值范围找出最佳组合，运算量较大，但对于 BOE 的设计，只要能得到高质量的输出光束，运算量大是可以接受的。

输入高斯光束不变，设理想输出空心光束内径 2.75 mm，外径 5.5 mm，分别采用平滑修正法、混合算法、改进的平滑修正法，得到光束截面如图 3 所

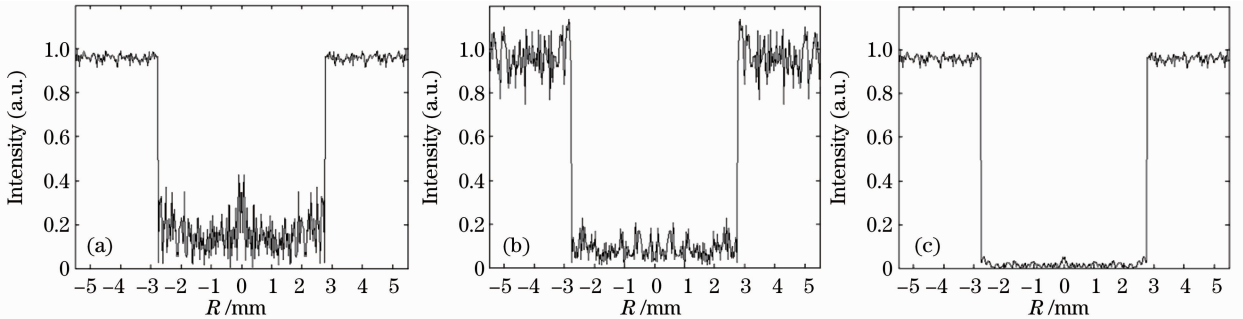


图 3 环形光束截面。(a)平滑修正法输出环光束截面；(b)混合算法输出环光束截面；(c)改进的平滑修正法输出环光束截面

Fig.3 Output annular beam section. (a) Output section of profile-smoothing algorithm; (b) output section of hybrid algorithm; (c) output section of improved profile-smoothing algorithm

示。光束质量评价见表 2,证明了改进的平滑修正法可以得到高质量空心环光束。

表 2 算法对环形圆光束整形的评价指标

Table 2 Evaluation indices of algorithms in hollow beam shaping

	η	$\sigma(\text{edge})$	$\sigma(\text{center})$	e
Profile-smoothing algorithm / %	89.5	0.5	1.6	3.4
Hybrid algorithm / %	93.2	1.4	1.2	2.3
Advanced profile-smoothing algorithm / %	98.4	0.6	0.3	1.3

4 相位拟合方法

BOE 设计最终目的是加工出能得到目标光束输出的 BOE 器件,但目前的制作工艺难以加工优化算法得出的精确相位,必须对相位进行拟合与简化。本文在 Zemax 光学设计软件中设计 BOE。BOE 由若干同心圆环组成,其径向相位分布可表达为

$$\phi(r) = |A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots| = 2\pi k, \quad (14)$$

式中 r 为环带归一化半径, k 为环带数^[4], A_i 为相位系数,一般 Zemax 软件中输入 5 阶相位系数即可达到精度要求,其中系数 A_1, A_2 的选择最为重要。 A_1 决定该面的旁轴光焦距,一般用于校正系统色差; A_2 用于校正系统单色像差。BOE 加工难度的主要评价指标为台阶深度 d 和最小台阶宽度 Δ , 分别表示为

$$d = [\lambda / (n - 1)] / N, \quad (15)$$

$$\Delta = (r_k - r_{k-1}) / N, \quad (16)$$

式中 λ 为系统中心波长, n 为基底材料折射率, N 为台阶数,环带深度仅与台阶数、波长和基底材料有关^[13]。最小台阶宽度取决于最边缘两环带水平间隔。

4.1 相位拟合过程

本文是对特定波长的激光束进行整形,没有消除色差的需要,也就无法利用消色差条件确定系数 A_1 以及焦距 f ,必须从其他途径得到相位系数。从 (14) 式可以看出,各环带边界相位值为 2π 整数倍,即相位曲线上 2π 整数倍的点即对应各环带半径。相位拟合的步骤如下。

1) 相位展开:优化算法得出的精确相位包裹在 $(-\pi, \pi)$ 之间,将其展开至 $(-2k\pi, 0)$;

2) 相位平滑:BOE 相位函数是规律的平滑曲线,所以要将展开相位进行最小二乘拟合,得到

$(-2k\pi, 0)$ 区间内的平滑相位曲线;

3) 相位重构:在平滑相位曲线上找 2π 整数倍的点对应半径值,即为各环带半径,依次将相位曲线变换回 $(-\pi, 0)$ 区间,得到规律的 BOE 相位。

可以看出,相位拟合的关键就是环带数 k ,基于菲涅耳波带片原理,有环带半径公式^[4]

$$r_k = \sqrt{2kf\lambda/L}, \quad (17)$$

式中 f 为元件焦距, L 为菲涅耳距离, k 为环带数。由于 f 未知,无法求得元件环带半径具体值,但能推出半径 $r_k = \sqrt{k} \sqrt{2f\lambda/L} = \sqrt{k}r_1$ 。对于 BOE,最大环带半径即为元件半径 R ,得到总环带数 $k = \lfloor (R/r_1)^2 \rfloor$ 。

4.2 相位拟合精度分析

相位拟合精度,即拟合相位与展开相位的均方误差,表征 BOE 可加工相位结构对原始精确相位的逼近程度,是评价可加工相位优劣的重要指标。本文中,拟合精度主要受初始半径和采样点数影响。对 3.2 节得到的精确相位做拟合,初始半径从 0.3 mm 到 2.46 mm,步长 0.01 mm,采样点数 $m = 200$,得到拟合误差曲线如图 4 所示。可以看出拟合误差随着初始半径的增大而增大,在工艺水平满足的前提下,可以选择尽量小的初始半径。

采样点数同样影响拟合精度,虽然在优化算法中,采样点数取得越多输出光束质量会越好,但相位拟合过程中采样点数增加同样伴随着误差的累积,不能简单认为采样点越多越好,需要分析采样点数和元件口径的关系。取采样点数分别为 100、200 和 300 点,BOE 半径 $R = 1 \sim 10$ mm,初始半径为 $R/5$,得到拟合误差的变化曲线如图 5 所示,可以看出元件口径与采样点数之间存在匹配关系,基本上,采样点数可随着口径的增大而相应增加,对半径小的元件,采样点过多反而会造成拟合误差加大。

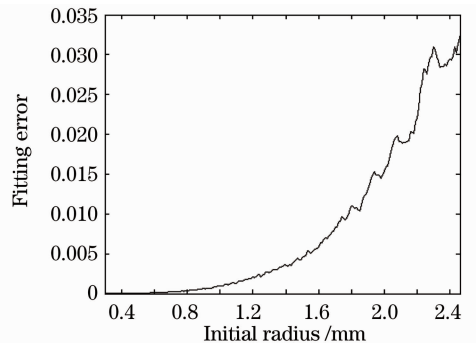


图 4 拟合误差随初始半径的变化

Fig. 4 Variation of fitting error with initial radius

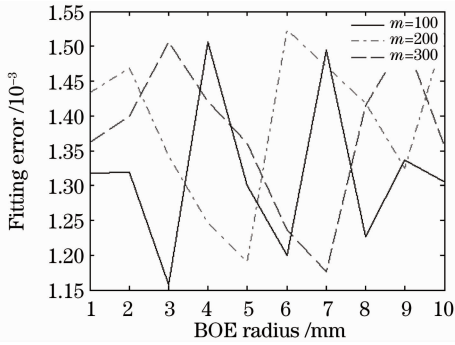


图5 拟合精度随口径和采样点数的变化
Fig. 5 Variation of fitting error with radius and sampling number

4.3 相位拟合结果

获得了元件半径、采样点数及初始半径与拟合精度的关系后,对3.2节得到的相位结构在采样点数 $m=200$,元件初始半径 $r_1=1\text{ mm}$ 时做拟合,此时环带数为31,没有选择更小的初始半径是为了在保证拟合精度的前提下,适当降低加工难度。原始精确相位、展开相位及拟合相位如图6所示。

最终得到BOE相位结构如图7(a)所示,从而得到衍射系数;选择K9玻璃作为基底材料,在Zemax软件中设计优化,得到的相位结构如图7(b)所示,二者相吻合。

输出光束及截面如图8所示,表3为光束质量

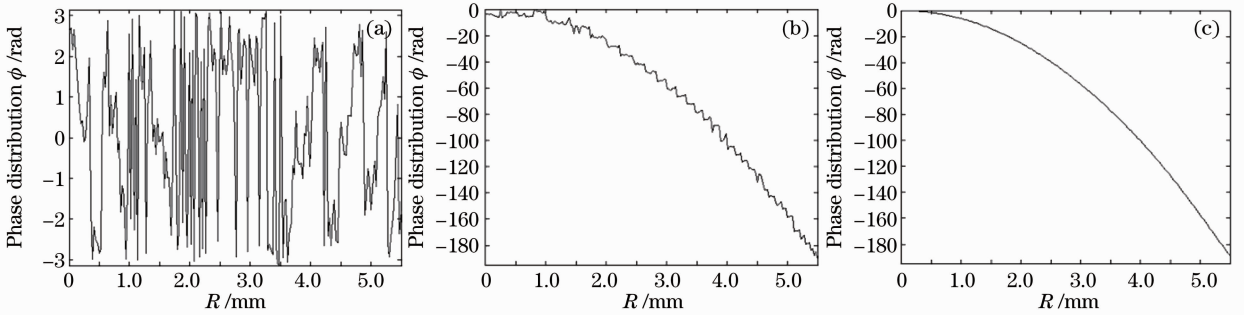


图6 相位拟合过程。(a)精确相位;(b)展开相位;(c)拟合相位
Fig. 6 Phase fitting process. (a) Accurate phase; (b) unwrapped phase; (c) fitting phase

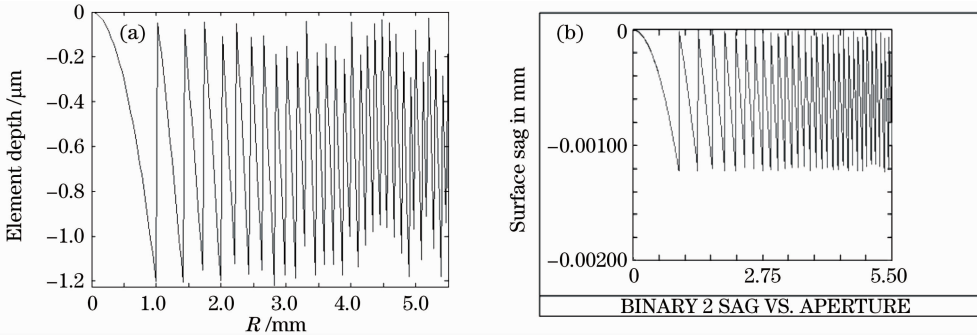


图7 BOE结构比较。(a) Matlab模拟的BOE相位结构;(b) Zemax中BOE结构
Fig. 7 Comparison of BOE structures in Matlab and Zemax. (a) BOE phase structure in Matlab; (b) BOE structure in Zemax

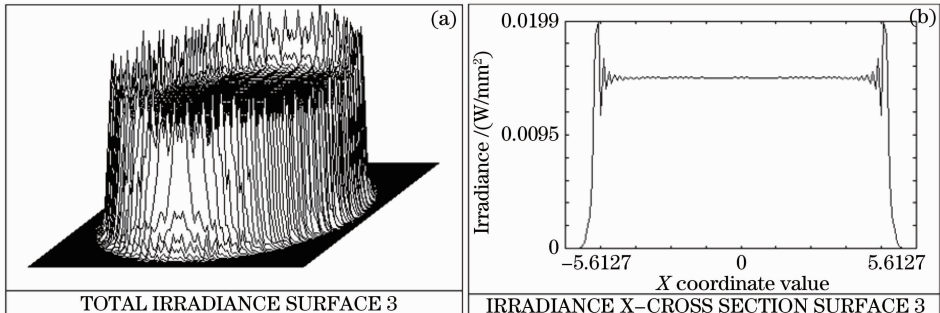


图8 Zemax中输出光束及截面。(a)输出光束;(b)输出光束截面
Fig. 8 Output beam in Zemax. (a) Output beam; (b) output beam section

评价参数。可以看出本设计的 BOE 可以将输入高斯光束整形为均匀圆光束输出,但边缘存在毛刺,有待进一步改进。BOE 环带最小水平间隔 $88\ \mu\text{m}$,最大环带深度 $1.2\ \mu\text{m}$,得到台阶深度 $0.15\ \mu\text{m}$,最小台阶宽度 $11\ \mu\text{m}$,目前的加工技术水平可以满足要求。

表 3 优化算法与 Zemax 仿真输出光束评价参数

Table 3 Evaluation indices of algorithm and Zemax simulation

	η	σ	e
Result of algorithm /%	98.6	0.006	0.0053
Result of Zemax simulation /%	96.12	7.18	1.49

5 结 论

本文从设计优化算法和拟合方式两方面入手,研究了提高 BOE 激光束整形性能的方法。提出了混合算法和改进的平滑修正法,在极坐标下分别对均匀圆光束和环形光束进行处理,得到了较高质量的输出光束。基于菲涅耳波带片公式确定环带关系;通过分析元件口径、初始半径和采样点数对拟合精度的影响,得到了最佳拟合条件。最后,在 Zemax 光学设计软件中得到了与模拟结果相吻合的 BOE 相位结构,并输出了均匀圆光束。

参 考 文 献

- 1 Li Ke, Shi Peng, Zhang Xiaobo *et al.*. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1972~1977
李 珂, 石 鹏, 张晓波等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1972~1977
- 2 Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2032~2036
马浩统, 周 朴, 王小林等. 基于液晶空间光调制器的激光束近场整形[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2032~2036
- 3 Chen Kai, Li Pingxue, Chen Meng *et al.*. Design and analysis of surface parameters of aspheric lenses system converting Gaussian beam to flattop beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,

- 2011, **48**(3): 032201
陈 凯, 李平雪, 陈 檬等. 高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计和面形参数分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(3): 032201
- 4 Jin Guofan, Yang Yingbai, Wu Minxian *et al.*. Binary Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 89~95
金国藩, 严瑛白, 邹敏贤等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 89~95
- 5 Yu Hao, Huang Linhai, Rao Changhui *et al.*. Application of G-S algorithm to the control of beam near-field intensity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1259~1264
余 浩, 黄林海, 饶长辉等. G-S算法在光束近场场强控制中的作用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1259~1264
- 6 Yang Guozhen, Dong Bizhen, Gu Benyuan. New design method of diffractive optical element [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1995, **32**(4): 48~53
杨国桢, 董碧珍, 顾本源. 衍射光学元件的设计新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 1995, **32**(4): 48~53
- 7 Wu Rong, Zhao Dongfeng, Dai Yaping. Optimize design of diffractive optics elements by parallel simulated annealing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2544~2548
邬 融, 赵东峰, 戴亚平. 并行模拟退火算法优化衍射光学元件设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2544~2548
- 8 U. S. J. Mahalb, H. J. Caulfield. Genetic algorithm for optical pattern recognition[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(9): 648~650
- 9 J. L. Martin, J. Thomson, Mohammad R. Taghizadeh. Iterative algorithm for the design of free-space diffractive optical elements for fiber coupling[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(10): 1996~1999
- 10 Xu Chao, Zhang Jingjuan, Chen Junben. A phase-only optical system for wavefront transformation of rotational symmetric beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 1993, **42**(8): 1245~1251
许 超, 张静娟, 陈俊本. 用于圆对称光束波前变换的位相型光学系统[J]. *物理学报*, 1993, **42**(8): 1245~1251
- 11 Lin Yong, Hu Jiasheng, Wu Kenan. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1682~1686
林 勇, 胡家升, 吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1682~1686
- 12 Yin Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong *et al.*. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics[J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(3): 336~380
印建平, 刘南春, 夏 勇等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(3): 336~380
- 13 Nong Wenjie, Jin Ning. Evaluation of binary optics manufacturing parameters [J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(6): 13~16
农文捷, 金 宁. 二元光学工艺参数计算[J]. *红外技术*, 2004, **26**(6): 13~16

栏目编辑: 谢 婧