

二元光学在强激光波面整形中的应用

金国藩, 谭峭峰, 严瑛白, 邬敏贤

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

[摘要] 文章首先介绍了二元光学波面整形器件的理论基础。在分析 GS、YG 等正反迭代算法存在问题的基础上, 提出三种优化算法, 即全局/局部联合搜索算法 (GLUSA)、爬山-模拟退火混合算法及多分辨率的混合优化算法。以惯性约束核聚变中光束匀滑为例, 进行了二元光学器件的位相设计, 获得了良好的位相结构与焦斑性能。采用旋转镂空掩模板制作了准连续位相器件, 并利用 CCD 与多种光强衰减片进行焦斑光强测量。实验结果表明: 获得了较好的顶部均匀性、陡边、小旁瓣、高主瓣能量利用率以及光斑中心没有锐脉冲的光强分布。

[关键词] 二元光学; 波面整形; 位相器件; 优化算法

1 引言

在惯性约束核聚变中, 对激光光束焦斑的光强分布有平顶、陡边、无旁瓣等特殊要求, 已利用随机位相板、相息图位相板等二元光学器件实现该束匀滑要求^[1~3]。在强激光的其他应用中, 对激光的波面、光强分布、光斑的形状与大小等也提出了许多特殊要求, 如在激光加工和热处理中, 需要各种形状大小可变的激光光斑^[4]; 在半导体激光器中, 需将像散光束转变为准直性好的圆形光束^[5]; 在原子光学中, 也需要特定形状的激光光斑, 实现激光冷却、激光捕获、原子囚禁等功能^[6]。

二元光学器件由于具有高衍射效率、更多的设计自由度与灵活性、宽广的材料选择性、可集成化与小型化, 在波面整形系统中获得了越来越广泛的应用。

2 理论基础

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。无论是菲涅尔衍射区, 还是夫琅和费衍射区, 均可认为是一种空间线性变换系统。输入面光场复振幅分布为

$$E_1(x^{(1)}, y^{(1)}) = f(x^{(1)}, y^{(1)}) \exp i\varphi_1(x^{(1)}, y^{(1)}) \in L^2,$$

输出面光场复振幅分布为

$$E_2(x^{(2)}, y^{(2)}) = g(x^{(2)}, y^{(2)}) \exp i\varphi_2(x^{(2)}, y^{(2)}) \in L^2,$$

输入输出的 L^2 空间变换 G 可表示为

$$E_2(x^{(2)}, y^{(2)}) = GE_1(x^{(1)}, y^{(1)}), \quad (1)$$

$(x^{(1)}, y^{(1)})$ 、 $(x^{(2)}, y^{(2)})$ 为输入面、输出面的坐标系。对于不同的使用要求, G 可代表不同的变换, 例如, 消除光学系统彗差的梅林变换、光学编码中的沃尔什变换等。

以傅里叶变换光学系统为例, 任何一个输入场 $E_1(x^{(1)}, y^{(1)})$, 可通过对其进行振幅、位相调制获得任意的输出场分布 $E_2(x^{(2)}, y^{(2)})$ 。其中振幅调制函数和位相调制函数分别为

$$\begin{aligned} & |F^{-1}\{E_2(x^{(2)}, y^{(2)})\}| / f(x^{(1)}, y^{(1)}), \\ & \arg[F^{-1}E_2(x^{(2)}, y^{(2)})] - \varphi_1(x^{(1)}, y^{(1)}), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 F^{-1} 为反傅里叶变换。

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: 利用具有位相分布函数 $\varphi(x, y)$ (透过率函

[收稿日期] 2000-04-13

[基金项目] “八六三”国家高技术资助项目 (863-416-2-3.7)

[作者简介] 金国藩 (1929-), 男, 浙江绍兴市人, 中国工程院院士, 清华大学教授, 博士生导师

数为 $\exp i\varphi(x, y)$ 的二元光学器件调制输入场 $E_1(x^{(1)}, y^{(1)})$, 使其经变换 G 后得到所需的输出场实振幅 $g_{obj}(x^{(2)}, y^{(2)})$ 。上述问题解的存在性和唯一性还未有定论, 但按照几何光学设计方法, 如透镜阵列、光楔阵列等, 能够获得确定解的结论, 使波面整形问题可以求得最优解。只要能得到满足使用要求的结果, 这样的解在物理上是有意义的。因此, 波面整形求解问题归结为求出 $\varphi(x, y)$ 值, 使

$$\min D(\varphi) = \| |G[E_1(x^{(1)}, y^{(2)})\exp i\varphi(x, y)] - g_{obj}(x^{(2)}, y^{(2)})| \|,$$

$D(\varphi)$ 为某范数下输出面光场实振幅的实际值与目标值之差, 对不同的波面整形要求, 可取不同的范数。

3 优化算法

在此, 以惯性约束核聚变中的光束匀滑器件为例进行位相设计。二元光学器件的位相优化求解可看成是一种振幅-位相恢复问题, 最基本的算法是 GS 算法^[7,8]和 YG 算法^[9]。GS 与 YG 算法均是一种正反迭代、局部优化算法, 存在位相分布不连续、含有许多位相突变点, 并对随机初始值敏感, 不能跳出局部极值点等问题。为解决这些问题, 提出了三种位相设计算法: 全局/局部联合搜索散发 (GLUSA)^[10]、爬山-模拟退火混合优化算法及多分辨率算法^[11], 如图 1 所示。

GLUSA 联合了遗传算法、模拟退火算法和爬山法的优化思想, 获得了较好的位相分布, 如图 2 所示。

但在 GLUSA 中, 遗传算法的交叉过程导致出现位相突变点, 对其进行改进, 剔除其中的遗传算法, 仅采用爬山法实现局部搜索及模拟退火法跳出局部极值点。控制每次位相随机扰动, 使位相分布从一个连续状态缓变为另一个连续状态, 确保优化得到的位相分布连续性。

在圆对称情形下, 可设二元光学器件的位相函数为:

$$\varphi(r) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i r + \varphi_{0i}) \quad (3)$$

其中, $\varphi(r)$ 为二元光学器件的位相分布, r 为器件半径, A_i 、 ω_i 与 φ_{0i} 分别为第 i 个正弦函数的振幅、频率与初始位相值, ω_i 、 φ_{0i} 由算法随机给出。正弦函数的连续性保证位相分布的连续性。

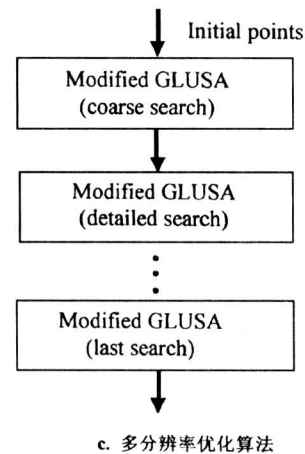
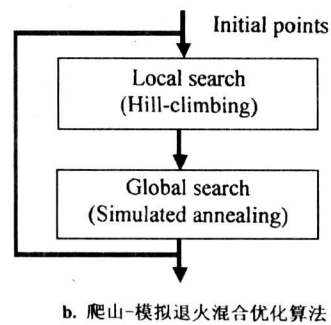
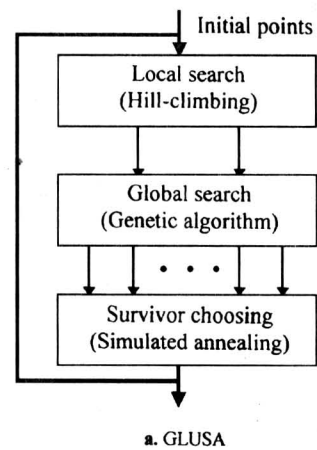


图 1 三种位相优化设计算法

Fig.1 Three kinds of phase optimization algorithm

针对平面波入射, 波长 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$, 焦距 $f = 320 \text{ mm}$, 器件直径 $D = 80 \text{ mm}$, 均匀焦斑直径 $d = 250 \mu\text{m}$ 。器件位相采样点数为 100 时, 所设计的二元光学器件的位相分布及归一化焦斑光强分布如图 3 所示, 位相分布比图 2 更连续。光能利用率和顶部不均匀性分别为 97.2% 和 6.39%。其中, 光能利用率

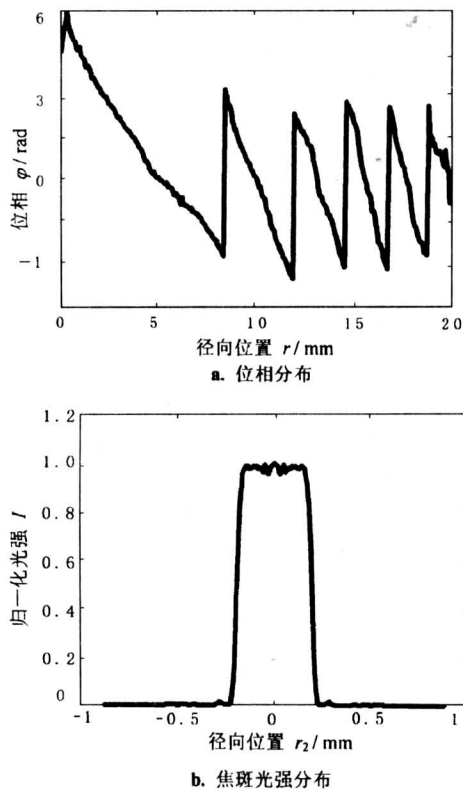


图 2 GLUSA 优化设计结果
Fig.2 Design results of GLUSA

$$\eta = \frac{\sum_{m=1}^M I(m)}{\sum_{\forall m} I(m)} \quad (4)$$

顶部不均匀性 (均方根)

$$\sigma = \frac{1}{M-1} \sqrt{\sum_{m=1}^M \left[\frac{I(m) - \bar{I}}{\bar{I}} \right]^2} \quad (5)$$

其中 $\bar{I} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I(m)$, $I(m)$ 为输出面上采样点的光强值, M 由均匀焦斑尺寸及光学系统参数确定。

在二元光学器件位相设计中,若采样点数少,分辨率小,则未能充分利用加工设备的精度。并且随着分辨率的提高,设计自由度将增大,能优化得到的性能参数将更好。但随着分辨率的提高,计算时间急剧增大。为解决分辨率、计算时间和性能参数之间的矛盾,提出了多分辨率优化思路。首先选用较小采样点数,通过“粗搜索”,在较短时间内寻求较好的初始解,然后逐步增加采样点数,不断地“精细搜索”,直至获得满足性能参数的位相设计结果。对图 3 的设计结果,再进行多分辨率优化,当采样点数为 200 时,设计得到的位相结构如

图 4,光能利用率和顶部不均匀性分别为 97.4% 和 5.61%。增加采样点数为 400 时,设计得到的位相结构如图 5,光能利用率和顶部不均匀性分别为 98.0% 与 4.00%。

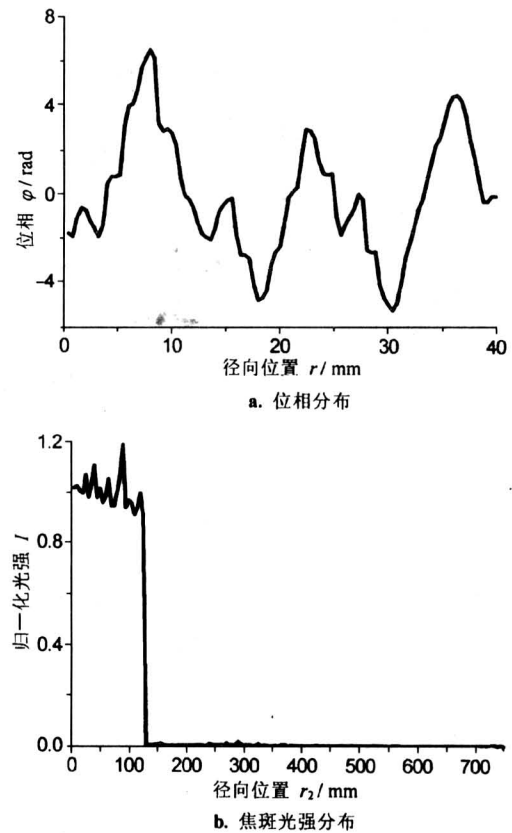


图 3 爬山-模拟退火混合优化算法设计结果
Fig.3 Results of the hybrid algorithm combining Hill-climbing with Simulated Annealing

由图 3~5 可知,随着采样点数的增加,分辨率的提高,所设计器件的性能参数有较大的改善,特别是顶部不均匀性,由 6.39% 改进到 4.00%。位相结构大体相同,只是在更高分辨率下,出现了更多的位相细微结构,改善了焦斑的顶部光强分布。

4 准连续器件加工与光强分布测量^[12]

在强激光系统中,要保证二元光学器件的抗激光损伤阈值。台阶型二元光学器件由于具有位相突变点,在结构上存在奇点,易导致激光损伤。为保证台阶型器件具有足够的衍射效率,需制作 16 阶

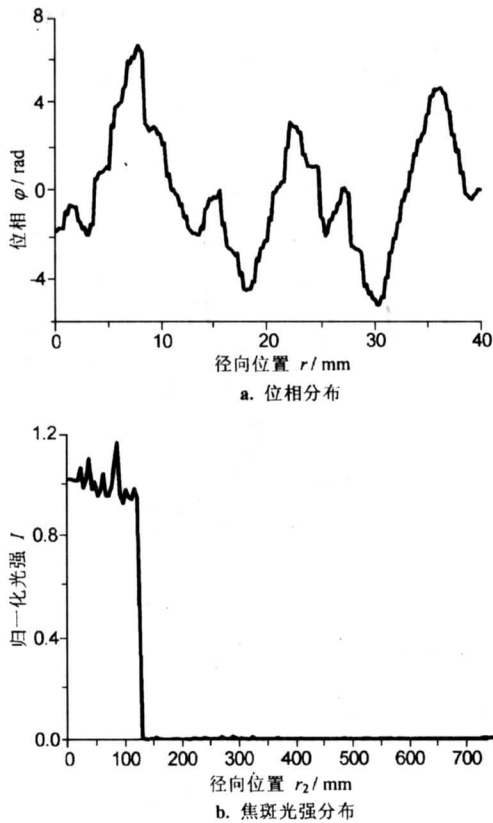


图 4 采样点数为 200 的优化结果

Fig.4 Optimization results with sampling number 200

甚至更高阶的位相结构，需套刻、刻蚀多次，掩膜板对准精度和深度刻蚀精度难以控制。此外，用台阶型浮雕轮廓近似连续浮雕轮廓，本身就带来误差，要减少这种误差，必须增加台阶数目。但随着台阶数目增加，图形线条变细，对准精度要求更高，加工更困难。为此，需进行连续浮雕轮廓的二元光学器件加工。

二元光学器件的刻蚀深度与刻蚀时间、曝光强度成正比。在相同的曝光强度下，控制不同区域的刻蚀时间，也能获取连续位相轮廓。用旋转掩膜加工圆对称器件时，刻蚀时间与相应的掩膜透光区对圆心的张角成正比。因此，从圆心开始在不同的半径处开具有正比于位相刻蚀深度张角的透光区。刻蚀时，镂空掩膜板与基片相对转动，在均匀紫外光源或离子源照射下，通过控制边缘区的刻蚀深度，能获得具有连续位相轮廓的二元光学器件。

用镂空掩膜板图 6 加工出准连续器件，其干涉图见图 7。从图中可以看出其位相是缓慢变化的。

利用普通的 CCD 进行焦斑光强分布测量，并为了提高 CCD 的测量动态范围，选用多种衰减片组合来获得大范围的准连续光强衰减，最后用数据处理程序得到光强分布。测量装置见图 8。

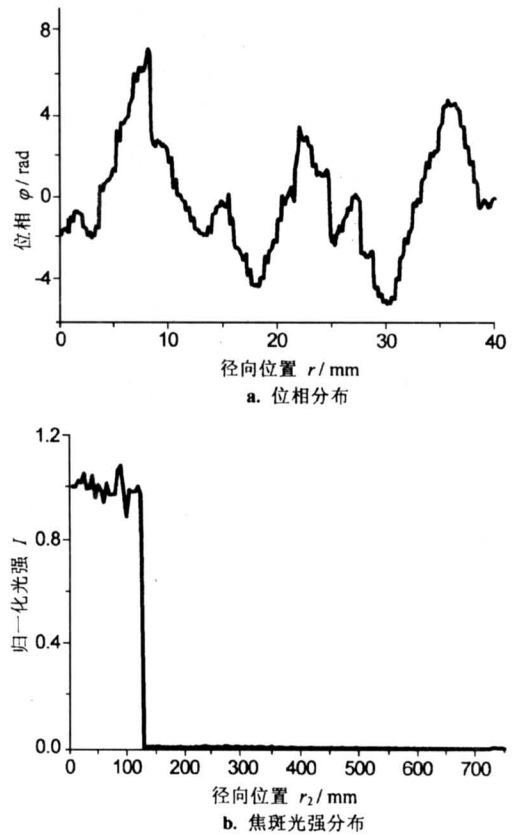


图 5 采样点数为 400 的优化结果

Fig.5 Optimization results with sampling number 400



图 6 旋转镂空掩膜板

Fig.6 HOLLOWED-OUT MASK

不放置准连续位相器件时，其焦斑光强分布如图 9 所示。在放置器件和不同衰减片组合的条件

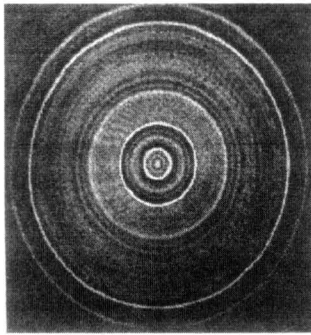


图 7 准连续器件的干涉图

Fig.7 Interferogram of the quasi-continuous BOE

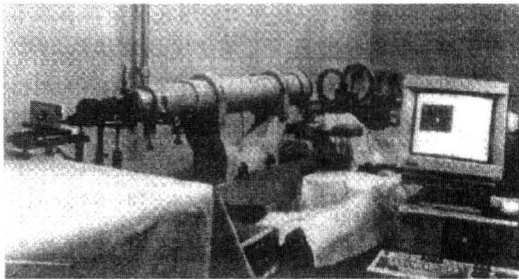


图 8 焦斑光强分布测量装置图

Fig.8 The experimental system of the intensity distribution measurement of the focused spot

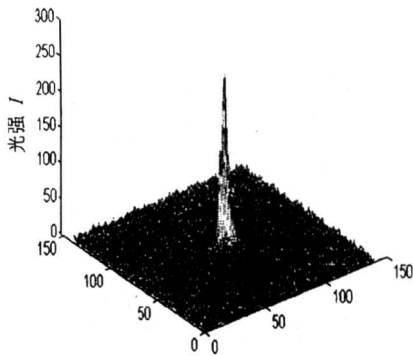
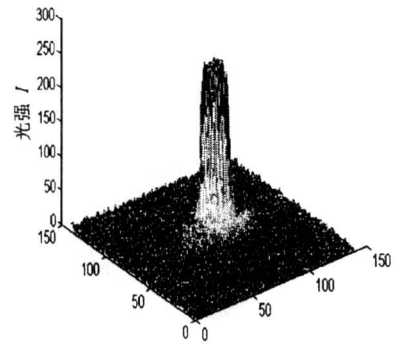


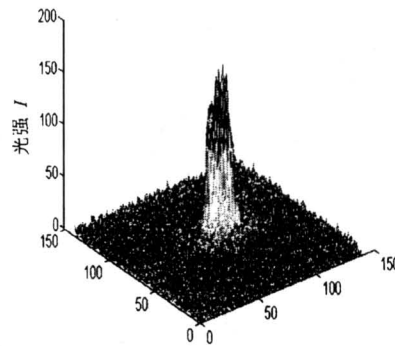
图 9 不放置器件的焦斑光强分布

Fig.9 Intensity distribution of the focused spot without the BOE

下，在焦点前 0.39 mm 处的垂轴面上光强分布如图 10，数据融合后，光强分布如图 11。测量结果显示，获得了具有较好的顶部不均匀性 13.4%、较高的主瓣光能利用率 90.3%、陡边、小旁瓣、25 倍衍射极限及没有零级锐脉冲的光斑。



a. 顶部稍饱和



b. 顶部不饱和

图 10 放置器件、两种衰减器组合下光强分布

Fig.10 Intensity distribution of the focused spot with BOE

5 其他波面整形功能

上述所研制的器件基本上验证了二元光学在惯性约束核聚变激光束波面整形的应用可行性。此外，二元光学器件不仅可获得均匀焦斑，还可利用“近似无衍射光束”思路，在一定轴向距离内，控制多个垂轴面上具有相似的光强均匀分布，则能在非垂轴面上获取均匀光斑^[13,14]；利用阵列器件在获取均匀焦斑的同时，可实现焦斑的几何形状变换，获取圆形、矩形、环状或直线形等几何形状的光斑^[14,15]。

二元光学器件除获取均匀光斑外，还能实现其他波面整形功能，例如长焦深器件^[16]、准直器件^[17]、消像散器件^[5]等。

6 结论

二元光学器件是一种纯位相器件，具有高的能量利用率；利用优化算法，可设计得到良好的波面整形效果；台阶型和连续型器件的加工条件在不断

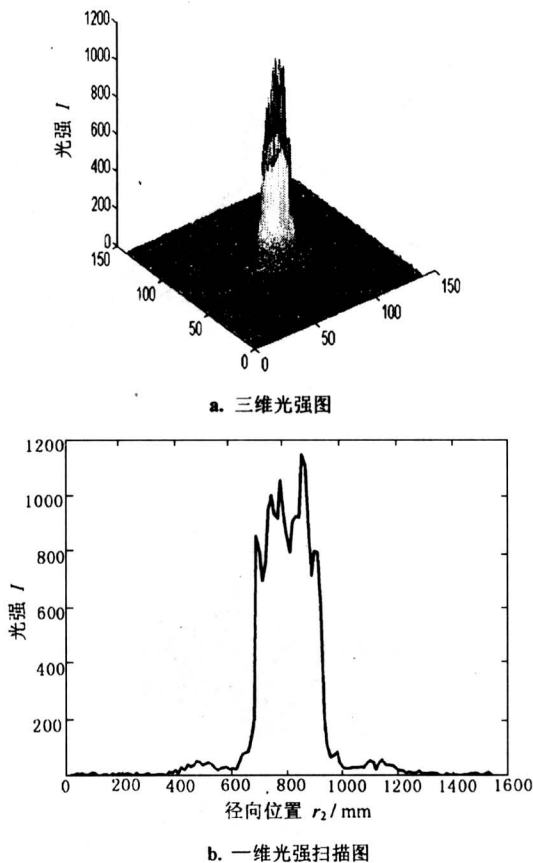


图 11 数据处理后的光强分布

Fig. 11 Intensity distribution of the focused spot after data processing

完善, 新工艺、新材料的研究不断取得进展, 有望制造出更佳波面整形功能的二元光学器件。二元光学必将在波面整形等特殊光学功能上发挥更大的作用。

参考文献

- [1] Dixit S N, Thomas M, Woods B W, et al. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32 (12): 2453~2554
- [2] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, et al. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control [J]. *Opt. Lett.* 1994, 19 (6): 417~419
- [3] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profile [J]. *Opt. Lett.* 1995, 20 (7): 764~766
- [4] Chen Yansong, Li Dehua, Sheng Yunlong. Beam-shaping element with reduced sensitivity to input variation [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (3): 568~571
- [5] 严瑛白, 王超, 邬敏贤, 等. 半导体激光器的二元光学消像散准直器件 [J]. *红外与激光工程*, 1996, 25 (5): 36~42
- [6] Yin Jianping, Zhu Yifu, Wang Wenbao, et al. Optical potential for atom guidance in a dark hollow laser beam [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, 15 (1): 25~33
- [7] Gerchberg R W, Saxton W O. Phase determination for image and diffraction plane pictures in the electron microscope [J]. *Optik*, 1971, 34: 275~284
- [8] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35: 237~246
- [9] 霍裕平, 杨国桢, 顾本源. 用光学方法实现么正变换及一般线性变换 (II 用迭代法求解) [J]. *物理学报*, 1976, 25 (1): 31~46
- [10] Zhai Jinhui, Yan Yingbai, Jin Guofan, et al. Global/local united search algorithm for global optimization [J]. *Optik*, 1998, 108: 161~164
- [11] Jin Guofan, Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, et al. Binary optics used in high laser shaping [J]. *SPIE*, 1999, 3862: 11~16
- [12] 谭峭峰, 严瑛白, 金国藩, 等. 实现光束变换的连续位相衍射光学器件的研制 [J]. *光学技术*, 1999, 140: 74~76
- [13] Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan, et al. Continuous-phase diffractive optical element for realizing uniform illumination on the plane non-perpendicular to the optical axis [J]. *SPIE*, 1999, 3778: 114~119
- [14] Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan, et al. Diffractive optical array element for realizing uniform spot on the plane non-perpendicular to the optical axis with geometrical shape transform [J]. *Opt. Comm.* 2000, 175: 13~18
- [15] 谭峭峰, 严瑛白, 金国藩, 等. 方形单元衍射光学阵列器件实现近圆形均匀焦斑 [J]. *光子学报*, 1998, 27 (8): 719~723
- [16] Xu Junquan, Bao Hongchun, Wu Minxian. A design of extreme long focal depth binary optical element [J]. *Chinese J. of lasers*, 1999, B8 (1) 55~60
- [17] 黄大为, 许俊泉, 刘海松, 等. 用于远距离准直的二元光学器件的设计 [J]. *仪器仪表学报*, 1996, 17 (1): 98~99

(下转第 39 页)

况；要尽快解决病险水库除险加固问题，进一步加大资金的投入；并进一步采用高新技术对大坝安全进行科学管理，等等，使我国大坝的安全面貌焕然一新。

主要参考文献

[1] 弓正华, 储海宁, 沈家俊, 等. 迈向 21 世纪的中

国水电站大坝安全监察 [A]. '99 大坝安全及监测国际研讨会论文集 [C], 北京: 中国书籍出版社, 1999.1~9
[2] 王仁钟, 李君纯, 刘嘉忻, 等. 中国水利大坝的安全与管理 [A]. '99 大坝安全及监测国际研讨会论文集 [C]. 北京: 中国书籍出版社, 1999, 10~14,

Overview on Safety and Management of Dams in China

Wu Zhongru

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

[Abstract] Dam is a kind of key infrastructure of national economy construction in chin, so it is of great significance to improve and strengthen dam safety consciousness and management. Dam safety situation is reviewed and safety management is outlined in this paper, and new notion is presented for the improvement of dam safety and management.

[Key words] dam; safety; management

(cont. from p.32)

Binary Optics Used in High Power Laser Shaping

Jin Guofan, Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Wu Minxian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] The principle of binary optics used for beam shaping is introduced. On the basis of the analysis of GS and YG algorithms, three algorithms are developed for phase design of the Binary Optical Element (BOE), including Global/local united searching algorithm (GLUSA), hybrid algorithm combining Hill-climbing with Simulated Annealing and its multi-resolution algorithm. For example, the BOE obtaining uniform focused spot for Inertial Confinement Fusion (ICF) is designed by the above algorithms. The simulated results show that fine phase structure and good characters of the focused spot are realized by using the hybrid algorithm. A continuous phase plate is manufactured with a rotating hollowed-out mask. The intensity distribution of the focused spot is measured by a common CCD and multi-attenuators with which the measurement dynamic range is increased. The experimental results after data processing show that the focused spot with steep edge, low side lobe, high light efficiency and fair uniformity of the main lobe without sharp peak at the zero order is obtained.

[Key words] beam shaping; binary optics; phase element; optimization algorithm

* * * * *