

文章编号: 1001-3806(2002)06-0463-03

用 HIO 算法研究光束的空间整形*

陶向阳^{1,2} 周南润¹ 吕百达^{1,2}

(¹江西师范大学物理与通信电子学院, 南昌, 330027) (²四川大学物理系, 成都, 610064)

摘要: 基于 HIO 算法, 设计了用于光束整形的二元光学元件, 从两条不同的途径给出了高斯光束的整形结果。所得“平顶”光束的顶部均匀性很好, 且边缘非常陡峭、旁瓣小, 表明 HIO 算法是用于二元光学元件设计的有效算法。

关键词: HIO 算法; 光束空间整形; 二元光学

中图分类号: O435 文献标识码: A

HIO algorithm for spatial beam shaping

Tao Xiangyang^{1,2}, Zhou Nanrun¹, Lü Baida^{1,2}

(¹College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, 330027)

(²Department of Physics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Based on HIO algorithm, binary optical elements for spatial beam shaping are designed. For Gaussian beams, the shaping result is put forward through two different ways. It is shown that a transversal intensity profile with sharp edge, low sidelobes and good uniformity is obtained. Therefore, HIO algorithm is an effective method to design binary optical elements.

Key words: hybrid input-output(HIO) algorithm; spatial beam shaping; binary optics

引言

在激光加工以及强激光的某些应用中, 要求边缘陡峭、无旁瓣、平顶光强分布的光束, 这就需要实际激光束作空间整形。整形的关键之一就是如何设计出合适的二元光学元件(例如相息板、连续分布相位板等)。二元光学元件只调整相位, 具有灵活变换光束的能力和衍射效率高、制作工艺简单等优点。计算所得的相位分布, 可以通过灰阶掩膜板及离子刻蚀工艺研制出相应的二元光学元件^[1]。处理这一问题常采用以下几种优化算法: GS 算法^[2,3](Gerchberg-Saxton algorithm)、遗传算法^[4,5](genetic algorithm)、模拟退火算法^[5](simulated annealing algorithm)、杨-顾算法(Y-G algorithm)^[6~8]、输入输出混合算法^[3,9~11](hybrid input-output algorithm, HIO 算法)。采用 HIO 算法设计了双二元光束整形系统, 分别从两条不同的途径对高斯光束的空间整

形问题作了研究, 所得“平顶”光束的顶部不均匀度 η 很小。

1 双二元光学元件设计

双二元光束整形系统如图 1 所示。BOE1, BOE2 为二元光学元件, 分别放在平面 P_1 和 P_2 处。 P_1 平面位于光束的束腰位置。设输入场分布为:

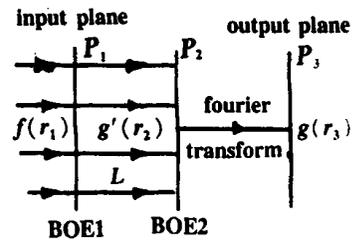


Fig. 1 Schematic diagram of spatial beam shaping system

$$f(r_1) = \exp(-r_1^2/w_0^2) \quad (1)$$

的高斯光束经 BOE1 相位板补偿后在自由空间中传输距离 L 到达 P_2 平面, 记其场分布为 $g'(r_2)$, $g'(r_2)$ 经 BOE2 相位板补偿后, 作傅里叶变换得输出平面 P_3 处平顶光场分布 $g(r_3)$ 。

输入光场分布 $f(r_1)$ 和 P_2 平面输出光场分布 $g'(r_2)$ 的关系为:

* 国家高技术激光技术主题项目和江西省自然科学基金资助项目。

作者简介: 陶向阳, 男, 1965 年 5 月出生。教授。现从事激光传输与变换的研究。

收稿日期: 2001-12-28; 收到修改稿日期: 2002-02-25

$$g'(r_2) = - \sqrt{\frac{i}{\lambda}} \int f(r_1) \exp[i\varphi_1(r_1)] \times \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda}(r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2)\right] dr_1 \quad (2)$$

式中, λ 为波长, L 为平面 P_1, P_2 之间的距离, $\varphi_1(r_1)$ 为 BOE1 的相位分布。

设在输出平面 P_3 处理想的 $g_I(r_3)$ 场分布为平顶光束, 由傅里叶光学的理论, 易知 P_2 平面理想的输出场分布 $G(r_2)$ 应具有 sinc 函数的形式, 即:

$$G(r_2) = C \cdot \text{sinc}(r_2) = C \cdot \frac{\sin(2\eta_0\pi r_2)}{\pi r_2} = C \cdot \left| \frac{\sin(2\eta_0\pi r_2)}{\pi r_2} \right| \exp[i\varphi_0(r_2)] \quad (3)$$

$$g_I(r_3) = \mathcal{A}G(r_2) \quad (4)$$

$$\varphi_0(r_2) = \begin{cases} 0 & 0 \leq r_2 \leq (2n+1)/2\eta_0 \\ \pi & (2n+1)/2\eta_0 \leq r_2 < (n+1)/\eta_0 \\ & (n = 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (5)$$

式中, C 为系数(其取值应保证能量守恒), η_0 为输出光束 $g_I(r_3)$ 的半径, $|\cdot|$ 表示取模, \mathcal{A} 示 Fourier 变换。

采用 HIO 算法, 其基本思路是先设定理想的输入光场分布和输出光场分布, 加入相位因子后反复进行迭代。经若干次迭代后, 振幅和相位都趋于稳定分布。算法过程描述如下:

(1) 设第 m 次入射光束相位分布为 $\varphi_{1,m}(r_1)$, 对 $f(r_1) \exp[i\varphi_{1,m}(r_1)]$ 作 Fourier 变换后得 P_2 平面处的场分布 $|g_m'(r_2)| \exp[i\varphi_{2,m}(r_2)]$;

(2) 构造函数 $|G(r_2)| \exp[i\varphi_{2,m}(r_2)]$ 作逆 Fourier 变换, 得到 $|f_m(r_1)| \exp[i\varphi_{1,(m+1)}(r_1)]$;

(3) 从(2)得出第 $m+1$ 次迭代的入射光场相位分布为 $\varphi_{1,(m+1)}(r_1)$ 。

计算出稳定相位分布 $\varphi_{1,m}(r_1), \varphi_{2,m}(r_2)$, 则 BOE1, BOE2 的相位设计结果分别为:

$$\varphi_1(r_1) = \varphi_{1,m}(r_1) - \pi r_1^2 / \lambda L \quad (6)$$

$$\varphi_2(r_2) = \varphi_0(r_2) - \varphi_{2,m}(r_2) \quad (7)$$

式中, $(\pi r_1^2 / \lambda L)$ 为光束在自由空间中传输距离 L 所引起的相移。迭代结束条件为相对误差 $\varepsilon_p(m)$ 小于给定值 δ , 即:

$$\varepsilon_p(m) = \frac{\sum | |g'(r_2)| - |G(r_2)| |^2}{\sum |G(r_2)|^2} \leq \delta \quad (8)$$

恢复的输出场分布与理想的输出场分布的绝对误差为: $\varepsilon_g(r_3) = ||g_I(r_3)| - |g(r_3)||$ (9)

不均匀度为^[12]: $\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%$ (10)

式中, I_{\max}, I_{\min} 分别为光束顶部的最大和最小光强。

2 数值计算结果

现以高斯光束均匀化为例来证实 HIO 算法用于二元光学元件设计的有效性。从两条不同的途径进行了数值模拟实验设计。设计参数为: $w_0 = 1 \text{ mm}, \lambda = 1.06 \mu\text{m}, L = 754.717 \text{ mm}, \eta = 1 \text{ mm}, C = 0.792$ 。

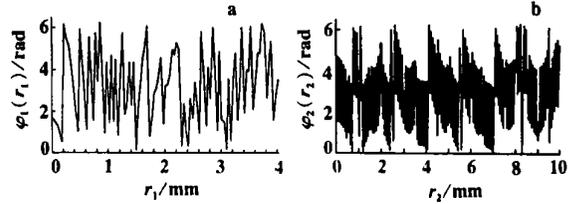


Fig. 2 a- phase distribution at the BOE1
b- phase distribution at the BOE2

第 1 条途径以 $G(r_2)$ 为理想的恢复对象, $g_I(r_3)$ 为 $G(r_2)$ 的理想输出场分布, 所得结果如图 2~ 图 4。图 2 是 BOE1, BOE2 的相位设计结果。图 3 是 P_3 平面处恢复的输出光场分布。绝对误差 $\varepsilon_g(r_3)$ 示于图 4, 且不超过 0.04。相对误差 $\varepsilon_p(m)$ 随迭代次数收敛很快, 最终不超过 0.1%, 充分表明了 HIO 算法的优越性。光束顶部的不均匀度 η 为 14.7%, 所得“平顶”均匀性较好, 且边缘非常陡峭、旁瓣很小, 恢复效果较好。光斑边缘出现两尖峰, 绝对误差 $\varepsilon_g(r_3)$ 相应地也有两个尖峰, 这是由于作离散 Fourier 变换时对 sinc 函数进行截断所引起的。

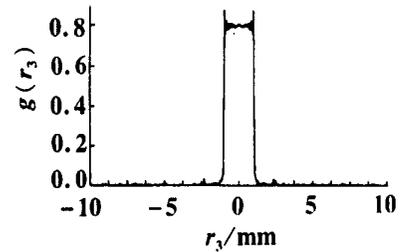


Fig. 3 Retrieval field distribution at the output plane

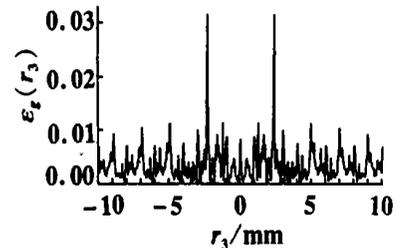


Fig. 4 Error distribution $\varepsilon_g(r_3)$

第 2 条途径以 $g_I(r_3)$ 为理想的恢复对象, $G(r_2)$ 为 $g_I(r_3)$ 的理想输入场分布, 结果如图 5~ 图 7。图 5 是 BOE1, BOE2 的相位设计结果。图 6

是恢复的输出光场分布。绝对误差 $\varepsilon_g(r_3)$ 示于图 7, 且不超过 0.02。光束顶部的不均匀度 η 为 1.65%, 与第 1 条途径相比, 大为减小。所得“平顶”均匀性很好, 且边缘非常陡峭、旁瓣很小, 光斑边缘无尖峰, 恢复效果很好。比较图 2 和图 5 可知, BOE1

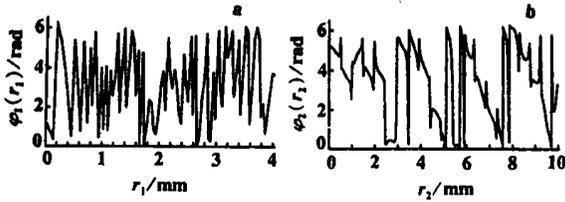


Fig. 5 a- phase distribution at the BOE1 b- phase distribution at the BOE2

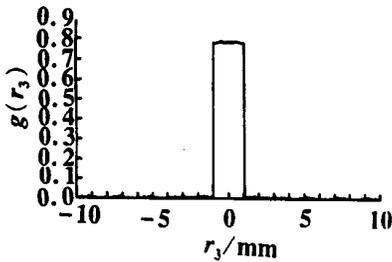


Fig. 6 Retrieval field distribution at the output plane

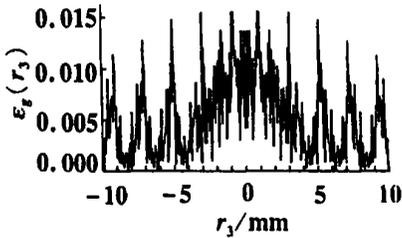


Fig. 7 Error distribution $\varepsilon_g(r_3)$

上的相位分布相近, 而 BOE2 上的相位分布相差较大, 这说明在二元光束整形系统中, 第 2 块相位板对整形结果起了重要作用。

3 结论

用 HIO 算法设计了用于光束空间整形的二元光学元件, 从两条不同的途径对高斯光束整形, 都得到了均匀性很好的“平顶”光斑, 且边缘陡峭、旁瓣很小。以均匀的平顶光束为恢复对象, 比以 sinc 函数分布的光束为恢复对象所得结果要好。整形结果表明 HIO 算法是处理光束整形的有效算法。

参 考 文 献

- [1] 谭峭峰, 严瑛白, 金国藩 *et al.* 光学技术, 1999(6): 74~ 76.
- [2] Gerchberg R W, Saxton W O. *Optik*, 1972, 35: 237~ 246.
- [3] Fienup J R. *Appl Opt*, 1982, 21(15): 2758~ 2769.
- [4] 张静娟, 姬 扬, 姚德成 *et al.* 物理学报, 1996, 45(5): 789~ 795.
- [5] 羊国光. 光学学报, 1993, 13: 577~ 584.
- [6] Yang G Zh, Dong B Zh, Gu B Y. *Appl Opt*, 1994, 33(20): 209~ 218.
- [7] Zhang G Q, Gu B Y, Yang G Zh. *Appl Opt*. 1995, 34(35): 8110 ~ 8115.
- [8] Tan X, Gu B Y, Yang G Zh. *Appl Opt*, 1995, 34(8): 1314~ 1320.
- [9] Lane R G. *Opt Commun*, 1987, 63: 6~ 10.
- [10] Parker C R, Bones P J. *Opt Commun*, 1992, 92: 209~ 214.
- [11] Takajo H, Takahashi T, Shizuma T. *J O S A*, 1999, A16: 2163 ~ 2168.
- [12] 吕百达. 强激光的传输与控制. 北京: 国防工业出版社, 1999.

(上接第 462 页)

$\theta = 0.6 \text{ mrad}$ 。主要原因是定轴偏差修正困难, 还要承担晶体炸裂风险, 所以修正没有到位。

3.2 晶体动态性能检测

将等离子体电极开关加上 $V_{\pi} = 9.8 \text{ kV}$ 半波电压, 测得开关速度为 $95 \mu\text{s}$, 开关效率达到 98%, 其性能满足物理实验要求^[2]。

4 结 论

大口径 KDP 晶体等离子体电极电光开关的性

能与晶体的质量、定轴精度、安装调试、高压等离子体电极放电等多种因素有关。为了提高它的工作性能, 进一步深入的研究工作还在继续进行。

参 考 文 献

- [1] Goldhar J, Henesian M A. *IEEE J Q E*, 1986, QE22: 1137 ~ 1147.
- [2] 鲁敬平, 郑奎兴, 张雄军 *et al.* 强激光与粒子束, 2000, 12(1): 137~ 140.