

用于半导体激光器光束整形的 衍射光学元件的设计研究^{*}

姬 扬 张静娟 姚德成

(中国科学技术大学研究生院, 北京 100039)

陈岩松

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(1995 年 5 月 30 日收到; 1995 年 8 月 3 日收到修改稿)

采用模拟退火法(SA)和输入-输出法(I-O)相结合的算法(SAIO)设计了 8 台阶的衍射光学元件, 将椭圆高斯分布的激光束变换到均匀圆光束, 转换到圆均匀区的能量效率达到了 91.9%. 计算结果表明, 用 SAIO 设计得到的输出波形边缘陡直, 在平顶区的起伏和光滑程度比单独使用 SA 或 I-O 有明显改善.

PACC: 4280K; 4230

1 引 言

随着半导体激光器在光纤通讯、光存储、光计算、泵浦固体激光器等许多方面得到越来越广泛的应用, 人们对于半导体激光器光束整形的工作越来越关注. 用衍射光学元件进行光束整形具有无能量损耗, 光强分布可整成任意特殊形状, 适用于任何波长的激光器, 可同轴使用, 能集成化, 微型化等特点, 同时它还能实现多种特殊功能, 因此这一课题是当前衍射光学研究的一个热点.

光束整形问题本质上是一个给定输入和输出, 求解逆衍射的问题. 目前已提出了多种不同的设计方法^[1-4], 但具体设计时大都考虑的是一维问题^[5-6]或可通过分离变量转化为一维问题的情形^[7].

众所周知, 半导体激光器的输出光束的强度分布为椭圆高斯型, 水平和垂直两个方向上的发散角相差很大, 将椭圆高斯束变换成圆均匀束是一个二维问题. 我们曾用输入-输出法对此问题进行过模拟计算及量化处理研究^[8,9], 该算法具有收敛快、抗干扰能力强等优点, 但容易出现阻滞陷入局域解, 且结果与初值选择有关. 为了克服上述缺点, 同时避免计算量过大, 本文采用将模拟退火法^[10]和输入-输出法相结合的算法来寻找近全局最优解, 设计了由两个取样点为 256×256 的 8 台阶衍射光学元件构成的菲涅耳波前变换系统, 同时完成整圆、准直、强度分布均匀化三种功能, 转换到均匀区的能量效率为 91.9%, 输出波形边缘陡

^{*} 国家自然科学基金和中国科学院基础局资助的课题.

直,在平顶区光强起伏小.新算法在设计衍射光学元件中有较大的通用性.

2 设计原理

一个典型的菲涅耳波前变换系统由同轴放置的相距为 L 的两个衍射光学元件 H_1 和 H_2 组成. H_1 改变输入面上波前 f 的相位分布,衍射后在输出面上形成所要求的输出波前 g 的实振幅分布 $|g|$.若只要求光束的强度变换,则一个位相元件就可以完成. H_2 的作用是调整输出相位分布,形成所要求的输出 g .

设 H_1 和 H_2 的相位分布函数分别为

$$H_1(x, y) = \exp(j\phi_1(x, y)), \quad (1)$$

$$H_2(x, y) = \exp(j\phi_2(x, y)). \quad (2)$$

一个复振幅分布为

$$f(x, y) = |f(x, y)| \exp(j\phi(x, y)) \quad (3)$$

的光波通过此系统后得到的复振幅分布为

$$g(x, y) = H_2(x, y) \iint_{-\infty}^{\infty} f(x_1, y_1) H_1(x_1, y_1) \times \exp\left\{j\frac{k}{2L}[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1, \quad (4)$$

其中 k 为波矢.

将 H_1 的相位分布、输入光波前的相位分布和菲涅耳变换引入的二次相位因子合并到一起,得到一个等效相位分布函数

$$\phi'_1(x, y) = \phi_1(x, y) + \frac{k}{2L}(x^2 + y^2) + \phi(x, y). \quad (5)$$

同样,将 H_2 的相位分布和菲涅耳变换引入的二次相位因子合并到一起也得到一个等效相位分布函数,

$$\phi'_2(x, y) = \phi_2(x, y) + \frac{k}{2L}(x^2 + y^2). \quad (6)$$

这样,将(5)和(6)两式代入(4)式可得到

$$g(x, y) = \exp(j\phi'_2(x, y)) \iint_{-\infty}^{\infty} |f(x_1, y_1)| \exp(j\phi'_1(x_1, y_1)) \times \exp\left(j\frac{k}{L}(xx_1 + yy_1)\right) dx_1 dy_1, \quad (7)$$

即 $g(x, y)$ 是等效物函数 $|f(x, y)| \exp(j\phi'_1(x, y))$ 的傅里叶变换与一个等效相位分布函数的乘积,因为 $\phi'_1(x, y)$, $\phi'_2(x, y)$ 与 $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_2(x, y)$ 之间的关系比较简单,由一个可以不难算出另一个.为了方便,下面将不加以区分,都用 $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_2(x, y)$ 代表.

模拟退火法就是仿照材料退火的过程,先使体系构型可以发生较大的变化(相当于体系被加热到高温),然后使构型的改变幅度逐渐减小(相当于逐渐降温),因为体系总的趋势是向低能态前进,而同时可按一定的概率接受能量较高的组态,所以用这种方法,可以

跳出局部极小,找到近全局最优解。

我们的新算法(SAIO)是用模拟退火法作基本框架,在其内部采用输入输出法进行优化。可以预期,新算法将有收敛快,可找到近全局最优解的特点。

SAIO 算法的流程大致如下:

1. 给 H_1 的相位分布随机地赋值 $\phi_1(x, y)$ 。

2. 用输入-输出法进行迭代运算,每一循环由下列 4 个基本步骤组成:

$$g'_i = \mathcal{F}\{\tilde{f}_i\} = |g'_i| \exp(j\Psi_i), \quad (8)$$

$$\tilde{g}_i = [|g| - \epsilon(|g'_i| - |g|)] \exp(j\Psi_i), \quad (9)$$

$$f'_i = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{g}_i\} = |f'_i| \exp(j\theta_i), \quad (10)$$

$$f_{i+1} = |f| \exp(j\theta_i), \quad (11)$$

其中 $|f|$ 和 $|g|$ 分别是已知的输入面和输出面上的实振幅分布, $\tilde{f}$ 和 $\tilde{g}$ 为设定的复振幅分布, Ψ_i 和 θ_i 为第 i 个循环中待恢复的相位分布函数 ϕ_1 和 ϕ_2 , ϵ 是调整因子, $0 < \epsilon < 1$, 它的作用是加快收敛速度, $\mathcal{F}$ 和 $\mathcal{F}^{-1}$ 是正、逆傅里叶变换。

用这一过程可以找到 ϕ_1 的一个局部优化解,一般仅需 20—30 次迭代即可。

3. 对 2 中得到的 ϕ_1 作一适当的改变

$$\phi'_1(x, y) = \phi_1(x, y) + \beta\xi(x, y), \quad (12)$$

其中 $\phi'_1(x, y)$ 为改变后的相位分布函数, $\xi(x, y)$ 为取值在 $(0, 2\pi)$ 内的随机函数, β 为幅度变动因子, $0 < \beta < 1$ 。这一步相当于对系统进行加热升温。

取误差函数为

$$D = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} (|g| - |\tilde{g}|)^2 dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} |g|^2 dx dy}, \quad (13)$$

$$\tilde{g} = \mathcal{F}\{|f| e^{j\phi_1}\}, \quad (14)$$

其中 $|f|$ 和 $|g|$ 为给定的实振幅分布, ϕ_1 为 H_1 的相位分布, $\tilde{g}$ 为输出面的复振幅分布, $\mathcal{F}$ 为傅里叶变换。

计算改变相位分布前后的 D_1 和 D_2 , 对于一个预先取定的数 P , 如果 $\frac{D_2 - D_1}{D_1} < P$, 则接受改变后的相位分布; 否则, 再试着改变一次构型直到满足上述条件。

4. 减小 β 和 P 的值, 转到 2。这一步相当于逐渐降低体系温度。

5. 结束, 结束条件为 D 小于阈值或大循环次数超过了预定值。

为了衡量输出波形的光滑程度, 引进了一个波形评价因子

$$Q = \iint_{-\infty}^{\infty} |\nabla(g - g')| dx dy, \quad (15)$$

其中 ∇ 为梯度算符, g 为期望的输出分布且已归一化, g' 为给定变换系统实际得到的输出分布。设

$$h(x, y) = g(x, y) - g'(x, y), \quad (16)$$

则在离散情况下, Q 可取为

$$Q = \sum_i \sum_{n.n.} |h_i - h_i(n.n.)| / N(n.n.) \quad (17)$$

其中 $n.n.$ 代表最近邻, h_i 为第 i 个点处 h 的函数值, $N(n.n.)$ 为最近邻的个数.

3 计算结果

我们用 SAIO 方法计算了将椭圆高斯光束变换成圆均匀光束的衍射光学元件的相位分布.

半导体激光器输出的基模椭圆高斯光束的复振幅分布为^[11]

$$f(x, y) = \exp\left\{-\left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2}\right)\right\} \exp\left\{-jk\left(\frac{x^2}{R_x} + \frac{y^2}{R_y}\right)\right\}, \quad (18)$$

其中 k 为波矢, w_x 和 w_y 为束径,

$$R_x = z_0[1 + (kw_{0x}/2z_0)^2], \quad (19)$$

$$R_y = z_0[1 + (kw_{0y}/2z_0)^2], \quad (20)$$

其中 z_0 为平面到椭圆高斯光束最细腰斑处的距离, w_{0x} 和 w_{0y} 为椭圆高斯束的最细腰斑处的特征束径.

在我们选取的位置上, $w_x = 1.30 \text{ mm}$, $w_y = 0.41 \text{ mm}$.

输出面期待的复振幅分布为

$$g(x, y) = g_0 \text{circ}(\sqrt{x^2 + y^2}/w_0), \quad (21)$$

其中 $w_0 = 1.1 \text{ mm}$, 由输入输出面上能量守恒可知 $g_0 = 0.485$.

输入输出面上取样点为 256×256 , 间距为 $40 \mu\text{m}$. 半导体激光器的输出波长为 672.7 nm .

输入输出面之间的抽样间隔满足下述关系:

$$\Delta x \Delta x' = \lambda L / N, \quad (22)$$

可以求出输入与输出面间距离为

$$L = 6.1 \times 10^2 \text{ mm}.$$

只采用输入-输出法, 一般在迭代 30 次左右时搜索停止; 采用 SAIO 算法一般需要 20 次模拟退火法迭代, 每一迭代中包含 20—30 次输入-输出法循环. 两种算法计算的结果见表 1, 输出波形如图 1—4 所示.

表 1 IO 法与 SAIO 法的比较(连续指相位分布可连续取值, 量化指对求得的连续相位分布进行了 8 台阶量化处理)

	IO		SAIO	
	连续	量化	连续	量化
能量效率/%	93.7	89.7	96.6	91.9
误差函数	6.12×10^{-2}	6.49×10^{-2}	4.54×10^{-2}	4.56×10^{-2}
波形评价因子	9.90×10^{-2}	9.75×10^{-2}	5.70×10^{-2}	5.87×10^{-2}

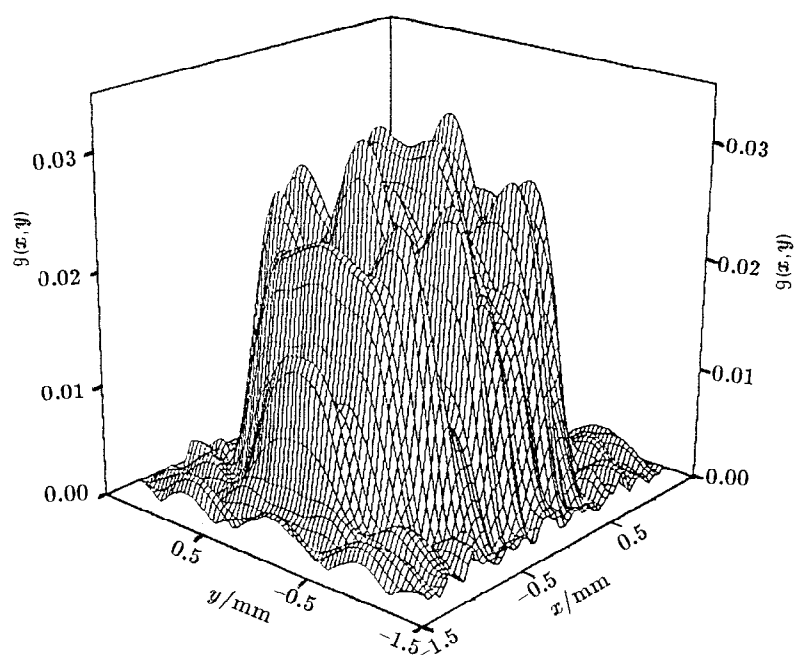
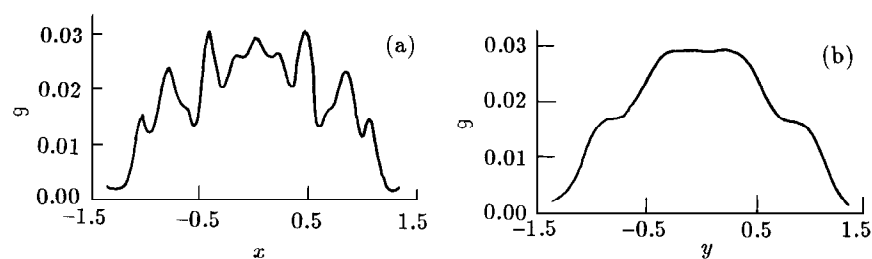


图1 IO法计算的输出波形

图2 IO法计算的输出波形 (a)沿 x 轴方向的分布;(b)沿 y 轴方向的分布

由上述图和表可以看出,SAIO方法计算得到的输出波形边缘陡直、平顶区内强度起伏较IO法所得有明显改善。

若只用SA法,则由于问题是二维的,样本空间太大,搜索速度极端缓慢。

4 掩膜板的设计

为了使用半导体微细加工工艺来制作衍射光学元件,需要将前面得到的相位分布进行量化处理,制出掩膜。

以8台阶量化为例,制备8台阶量化的衍射光学元件需要3块掩膜板。将前面得到的

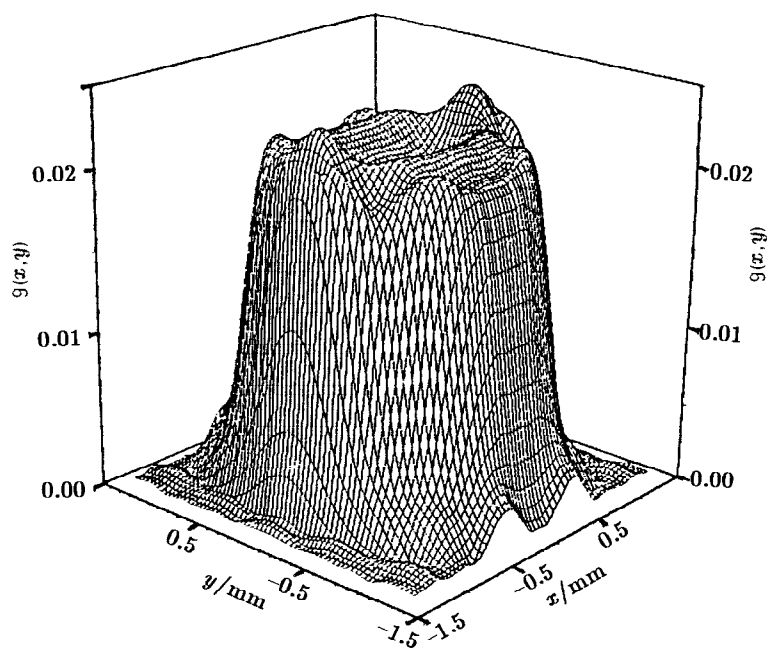
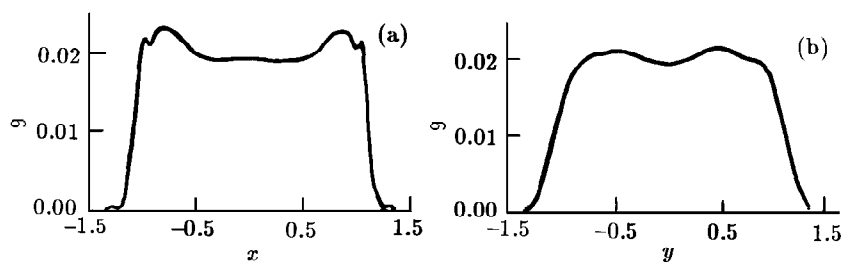


图3 SAIO法计算的输出波形

图4 SAIO法计算的输出波形 (a)沿 x 轴方向的分布;(b)沿 y 轴方向的分布

位相值进行8台阶量化处理,每一点位相值就可以用一个3位二进制数来表示,如 $7 \times \frac{2}{8}\pi$ 用 111 来表示, $3 \times \frac{2}{8}\pi$ 用 011 来表示.每一块掩膜板对应于量化相位二进制表示中的每一位,若该点对应的二进制数为1,则该处掩膜不让光透过,否则让该处透光.

制出的 H_1 的掩膜板的形状如图5所示.

用离子刻蚀工艺制备衍射光学元件时,对第 i 块掩膜板要求的刻蚀深度为

$$d_i = \lambda/2^i (n-1) \quad i = 1, 2, 3, \quad (23)$$

其中 λ 为波长, n 为材料的折射率.

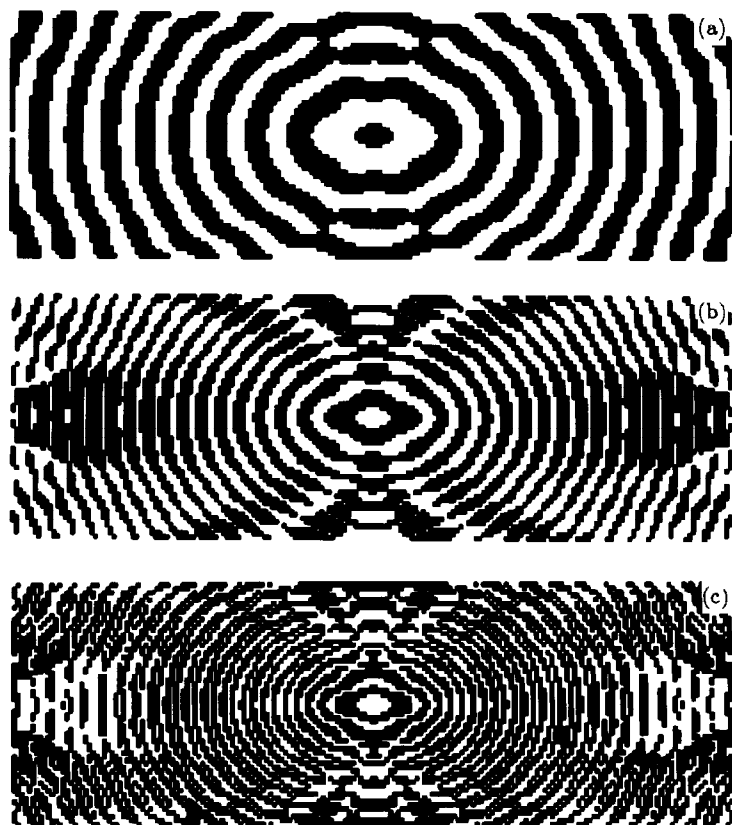


图5 制备 H_1 所用的掩膜板 (a)第一块掩膜板;(b)第二块掩膜板;(c)第三块掩膜板

5 结 论

模拟退火法和输入-输出法相结合的 SAIO 方法用来设计衍射光学元件具有较大的普遍性.用它设计的波前变换系统将椭圆高斯光束变换成均匀圆光束,变换到均匀区的能量转换效率为 91.9%,输出波形边缘陡直,平顶区内的光强起伏很小.

- [1] R. W. Gerchberg, W. O. Saxton, *Optik*, **34**(1971), 357; *Optik*, **35**(1972), 237.
- [2] J. R. Fienup, *Appl. Opt.*, **21**(1982), 2758.
- [3] G. Yang, B. Dong, B. Gu, J. Zhang, O. K. Ersoy, *Appl. Opt.*, **33**(1994), 209.
- [4] U. Mahlab, J. Shamir, *Appl. Opt.*, **31**(1992), 1117.
- [5] R. S. Roux, *Opt. Eng.*, **30**(1991), 529.
- [6] 许 超、张静娟、陈俊本, *物理学报*, **42**(1993), 529.
- [7] C. C. Aleksoff, K. K. Ellis, B. D. Neagle, *Opt. Eng.*, **30**(1991), 537.
- [8] 姬 扬、张静娟, *光学学报*, **23**(Z₂)(1994), 84.
- [9] 张静娟、姬 扬, 1994 年光电子器件与集成技术年会论文集(杭州, 1994), 第 342 页.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, *Science*, **220**(1983), 671.

[11] 魏光辉、朱宝亮, 激光束光学(北京工业学院出版社, 北京, 1988), 第 62 页.

DIODE-LASER BEAM CONVERSION WITH DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

Ji YANG ZHANG JING-JUAN YAO DE-CHENG

(Graduate School, University of Science and Technology of China, Beijing 100039)

CHEN YAN-SONG

(Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

(Received 30 May 1995; revised manuscript received 3 August 1995)

ABSTRACT

A pair of diffractive optical elements are desinged to implement the wavefront transformation from an elliptical-gaussian beam to a flat-top circular beam, with the aid of a new algorithm (SAIO) composed of a simulated annealing algorithm (SA) and an input-output (IO) algorithm. The energy transformation efficiency is up to 91.9% . SAIO performs better than SA or IO alone.

PACC: 4280K; 4230