

一种设计二元衍射元件的优化方法

陈岩松 李德华

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(1994 年 10 月 19 日收到)

基于菲涅耳衍射原理和 Gerchberg-Saxton 的迭代算法, 提出一种孔径分区设计二元衍射元件的优化方法. 采用此方法设计的二元衍射元件产生的目标光强于输入激光的模式是不敏感的. 具体设计与研制了用于 CO_2 激光表面淬火处理的二元衍射元件, 该衍射元件使 CO_2 激光束变形成 $12\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的矩形光斑. 试验结果表明, 产生的目标光斑满足设计要求.

PACC: 4280K; 4230

1 引 言

基于各种不同实际应用的需要, 利用纯位相衍射光学元件使光束变形, 是衍射光学研究的早期课题之一. 例如用二元光学元件使激光雷达光束展拓为光强均匀平坦分布^[1], 用二元光学元件使高斯激光束变换成光强均匀分布的圆形光斑^[2,3]. 在所有这些研究中, 输入的激光束模式都是稳定的, 且一般指的是激光的 TEM_{00} 模式, 即高斯光束而言的. 但是, 对于高功率激光器, 例如横向激励的 CO_2 激光器, 其输出激光束的模式往往是多模形成的, 且不稳定. 目前, 适应这种多模激光束的衍射元件的设计研究还不多, 它有待于更进一步研究.

用于激光加工与热处理的横向激励的高功率 CO_2 激光器, 其输出的激光束一般是多模式的和不稳定的. 自然它通过二元衍射元件后产生的变形光束的形状与强度分布当然也是不稳定的. 但是, 在实际使用问题中, 却需要使用稳定的激光变形光斑, 即保持光斑形状与强度分布相对稳定. 例如, 在激光表面淬火处理中, 要求 CO_2 激光束稳定於某种所需的光强度分布和形状. 这就是说, 需要设计一种二元衍射器件, 它不但使激光束通过它后变换成所需的光束形状与光强分布, 而且在激光模式变化时, 其变形光束的形状与光强分布保持相对稳定. 换言之, 它对激光模式的变化是不敏感的.

本文基于菲涅耳衍射原理, 提出一种输入孔径分区设计的迭代算法, 用此算法设计的二元光学器件可以适用于非稳的多模激光.

2 算 法 原 理

在二元衍射光学研究中, 存在着许多种不同的设计方法^[4-7], 诸如模拟退火法和 Gerchberg-Saxton(缩写为 GS)设计算法等. 在这里, 基于 GS 算法, 我们叙述一种菲涅耳衍

射迭代算法.通过适当选择迭代初值,迭代可以很快收敛.

下面为了简洁起见,让我们在一维空间中考察问题.设波长为 λ 的激光束照射到衍射元件平面,通过它的衍射作用在距离为 z 的平面上形成的光场分布

$$o(u) = \int f(x) d(x) \exp\left[\frac{i\pi}{z\lambda}(x-u)^2\right] dx, \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 与 $d(x)$ 分别是输入激光束与衍射元件的复振幅分布, $d(x)$ 为纯相位函数形式,

$$d(x) = \exp[i\varphi(x)]. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式并经过整理和吸收二次相位因子,得到傅里叶变换式及其逆变换式

$$G(u) = \int g(x) \exp\left(-\frac{i2\pi xu}{\lambda z}\right) dx, \quad g(x) = \int G(u) \exp\left(\frac{i2\pi ux}{\lambda z}\right) du, \quad (3)$$

式中

$$G(u) = o(u) \exp\left(-\frac{i\pi u^2}{\lambda z}\right), \quad g(x) = f(x) \exp\left[i\varphi(x) + \frac{i\pi x^2}{\lambda z}\right]. \quad (4)$$

给定输出平面上目标光强分布 $|o(u)|^2$ (相位可任意配置). 利用(3)式的正与逆傅里叶变换迭代关系式, 原则上可以求出产生目标光强分布的二元衍射元件的相位分布 $\varphi(x)$. 这个迭代过程的关键是迭代初值 $\varphi_0(x)$ 的正确选取, 选取初始值合适, 则迭代收敛快, 最终求得的衍射元件相位值及其产生的光强分布精确度高, 噪音小. 反之, 则事倍功半.

初始相位值的选择主要依赖于目标光强分布函数. 对于本文要求设计的那种光强呈凹透镜分布的矩形光斑, 采用光强-坐标调整法求解初始相位值是一个有效的方法. 所谓光强-坐标调整是指输入孔径内的光强分布, 通过坐标变换, 使某处光强分散变弱, 而另一处的则集中增强, 以实现输出平面上目标光强分布的要求. 因此, 输入孔径光强分布积分式与目标光强分布积分式之间有下列关系:

$$\int_a^b |f(x)|^2 dx = \int_s^t |o(u)|^2 du. \quad (5)$$

通过数值解法, 从上式可以给出系列坐标 (a, b) 与 (s, t) 之间的一一对应关系, 并通过此种对应关系确定出形成目标光束所要求的衍射角

$$\tan\theta_1 = (s-a)/z, \quad \tan\theta_2 = (t-b)/z, \quad (6)$$

而衍射角方向的切向则组成波面相位. 因此, 波面相位可由下式求出:

$$\varphi(a) = \int \frac{2\pi}{\lambda} \tan\theta_1(a) da, \quad \varphi(b) = \int \frac{2\pi}{\lambda} \tan\theta_2(b) db. \quad (7)$$

这样得到的波面相位作为初始相位值是十分适宜的, 因为它产生的目标光强分布实际上已经近似满足要求了, 再经过次数不多的迭代运算就可以求得比较理想的目标光强分布. 在实际操作中, 初始相位分布只需使用(6)式中的一个即可, 此时另一个作为初始相位分布的起点或终点.

上述情况清楚地表明, 输入光场分布与目标光强分布之间是有明确对应关系的. 一旦输入光场发生了变化, 如非稳的多模激光束那样, 那么目标光强分布也会发生变化. 但是, 能否找到某种方法, 使目标光强分布变化减少到最小, 以至符合使用要求呢? 答案是肯定

的.

让我们把输入孔径光场分成 i 区 ($i = 1, 2, \dots, N$), 则对于每一区都有 (5), (6) 与 (7) 式的表达关系式, 并由此得到 i 个初始相位分布, 它们首尾相接组成一个初始相位分布. 然后用它代入 (4) 式, 并通过 (3) 式所示的关系式进行迭代运算, 得到产生目标光强分布所对应的二元衍射元件的相位分布.

使用这样设计的二元衍射元件产生的目标光强分布, 对于输入孔径内的激光模式变化与光强分布的不稳定, 是不敏感的, 即当输入激光束形状与强度变化时, 目标光强分布保持一定程度的稳定.

3 设计实例

在 CO_2 激光表面淬火处理中, 为了提高淬火处理的效率和质量, 要求把 CO_2 激光束变换成矩形光斑, 强度分布呈凹透镜状分布, 情况正如图 1 所示那样, CO_2 激光束通过衍射元件 D , 在距离为 z 的平面内形成矩形目标光斑 O , 其强度分布在 x 方向为凹透镜状, y 方向均匀分布.

要求设计的目标光斑的具体尺寸为 $12 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 二元衍射元件有效输入孔径为 $\phi 40 \text{ mm}$, 它距目标光斑的距离为 400 mm . 衍射元件设计成折射-衍射复合形式, 即元件二个面分别是起折射作用的透镜和起衍射作用的刻蚀面, 这样做的优点是可以大大降低射面的设计与制作难度.

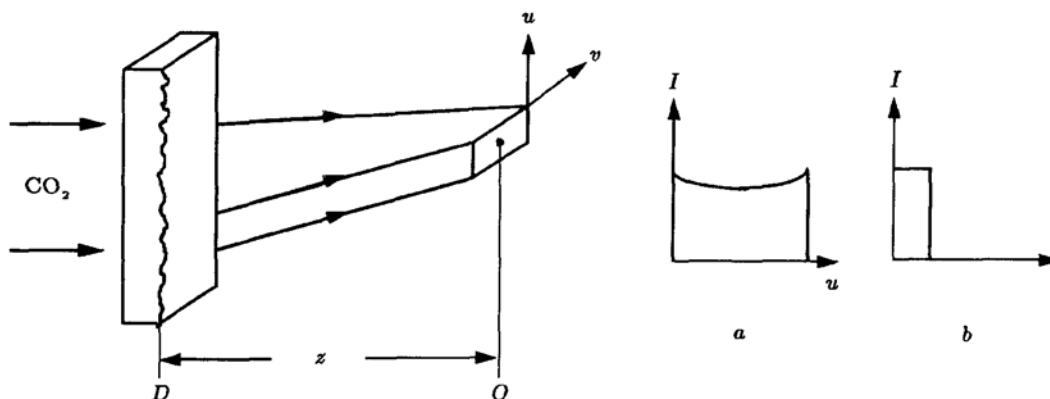


图 1 CO_2 激光束被二元衍射元件变换成矩形光斑 a 和 b 分别为光斑沿 x 与 y 方向的光强分布

采用上节中叙述的迭代算法和初始相位分布的确定方法, 对于高斯型输入光束和输入孔径几种分区情况, 通过计算机具体地进行了设计计算, 结果表示在图 2, 图 3 和图 4 中. 图 2 表示的是整个输入孔径为一个区, 高斯束输入与非高斯束输入时它们所对应的输出目标光斑的强度分布情况, 而对于输入孔径分为 5 个区与 15 个区的情况则分别表示在图 3 与图 4 中. 比较这 3 个图的结果不难发现, 输入孔径分区后, 通过二元衍射元件产生的目标光斑相对于输入激光束的变化而言基本上是稳定的, 其中只存在一些细致结构的

差别, 这些细小差别一般在使用中不会产生有害效果. 并且如果需要, 可以采用设计技巧使它们减小到最低程度.

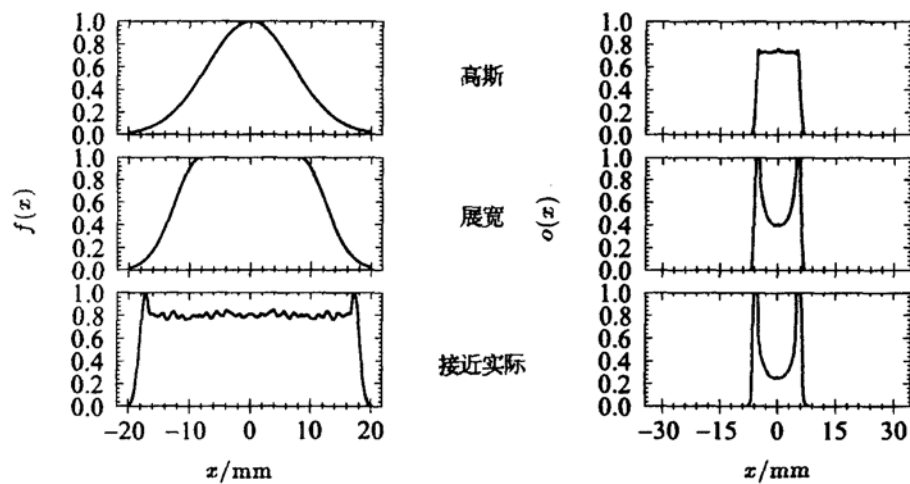


图2 输入孔径是单个区时的输入光强分布 $f(x)$ 与对应的目标光强分布 $o(x)$

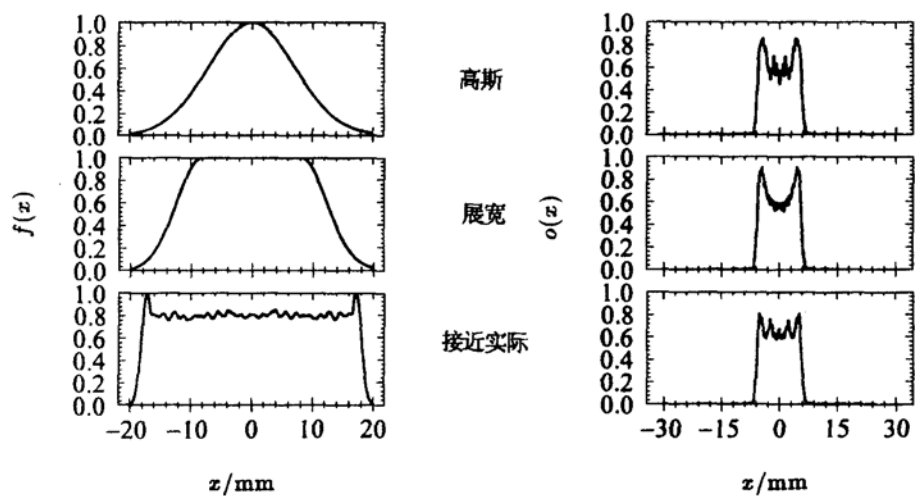


图3 输入孔径分为5个区时的输入光强分布 $f(x)$ 与对应的目标光强分布 $o(x)$

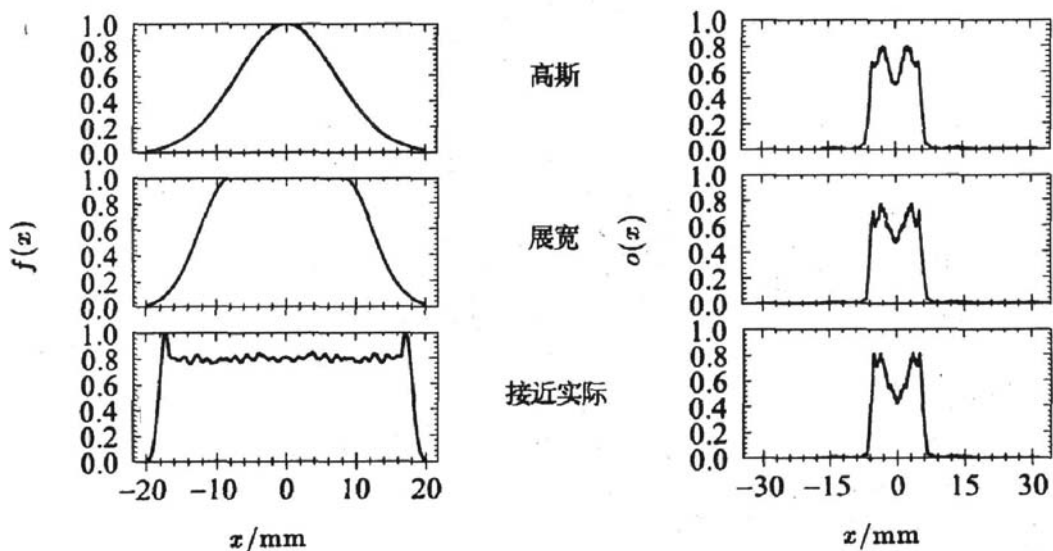


图4 输入孔径分为15个区时的输入光强分布 $f(x)$ 与对应的目标光强分布 $o(x)$

4 实验结果

上节中对三种不同分区情况的二元衍射元件的相位分布进行了设计运算. 在这里, 我们采用对应于5区的相位分布数据. 通过掩膜制备、光刻、离子刻蚀这样一套微电子工艺技术流程, 研制所需的二元衍射元件. 在 2π 相位周期中分为16等分, 因此需要制备4套掩膜, 从光刻到离子刻蚀需要套刻4次.

衍射元件的外形尺寸直径为 $\phi 50$ mm、厚度为5 mm的圆盘, 刻蚀区域, 即衍射区域直径为 $\phi 40$ mm. 从衍射元件到目标光斑的工作距离为400 mm. 元件的制备采用适用大功率 CO_2 激光的 GaAs 材料. 元件的前后表面镀增透膜, 衍射效率测量值为96.5%.

大功率 CO_2 激光器的输出光束(1200 W)在胶木上灼痕表示在图5中, 它表明激光束是复杂的多模式. 图6是激光束通过二元衍射元件后, 形成的目标光斑在胶木上的灼痕(a)和在有机玻璃上的烧蚀孔(b), 从烧蚀孔的侧面可以清楚看出光强呈凹形分布. 图6表明, 设计研制的二元衍射元件达到预期效果, 可以满足激光表面淬火处理的要求.

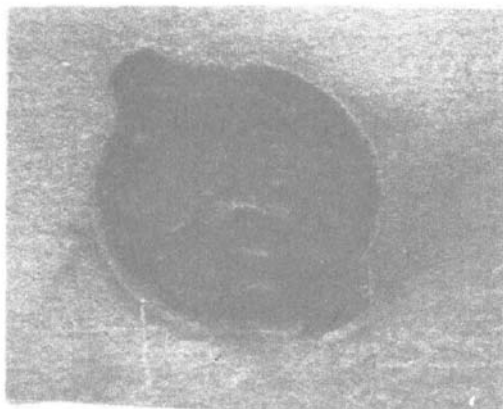


图5 大功率 CO_2 激光器激光束在胶木上的灼痕

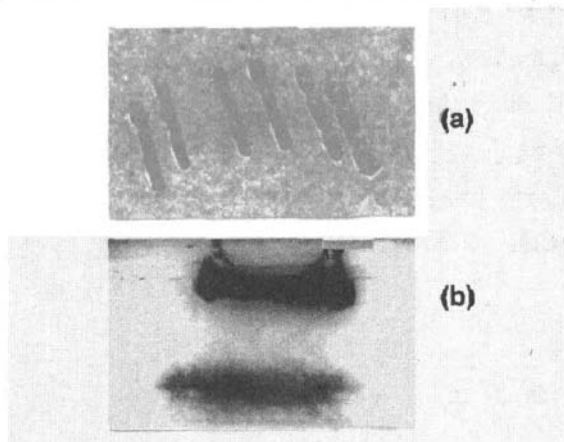


图6 二元衍射元件产生的目标光斑在胶木上的灼痕(a)和在有机玻璃上的烧蚀孔(侧视)(b)

5 结 论

提出了一种二元衍射元件的优化设计方法,给出了设计所需要的迭代运算关系式.此方法可以设计那种适用于非稳的多模激光束的二元衍射元件.

具体设计研制了用大功率 CO_2 激光表面淬火处理的二元衍射元件,该衍射元件把激光束变形为 $12\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的目标光斑、衍射效率达 96.5%.

- [1] W. B. Weldkamp and C. J. Jastner, *Appl. Opt.*, **21**(1982), 345.
- [2] Chao Xu and Zhang Jing-juan, *Acta Physica Sinica*, **42**(1993), 1245(in Chinese).
- [3] F. S. Roux, *Opt. Eng.*, **30**(1991), 529.
- [4] J. R. Fienup, *Opt. Lett.*, **3**(1978), 27.
- [5] J. R. Fienup, *Opt. Eng.*, **19**(1980), 297.
- [6] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., M. P. Vecchi, *Science*, **220**(1983), 671.
- [7] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach and D. W. Sweeney, *Appl. Opt.*, **26**(1987), 2788.

AN EFFECTIVE METHOD FOR DESIGNING BINARY OPTICAL DIFFRACTIVE ELEMENTS

CHEN YAN-SONG LI DE-HUA

(*Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

(Received 19 October 1994)

ABSTRACT

Based on the principle of Fresnel diffraction and Gerchberg-Saxton algorithm, an effective method for designing binary optical diffractive elements (BODE) is presented. The objective light distribution, generated by a BODE designed by this method, is not sensitive to laser mode. A BODE, used in quenching treatment of CO_2 laser, was designed and fabricated by photolithography and ion etching techniques. The element could transform a CO_2 laser beam into rectangle beam shape with dimensions $12\text{ mm} \times 2\text{ mm}$. The experimental results are satisfactory for the quenching treatment.

PACC: 4280K; 4230