

多模激光均匀化的新设计方法*

李永平 吴鸿兴

(中国科技大学物理系)

A new design method to uniform multi-mode lasers

Li Yongping, Wu Hongxing

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei)

提要: 采用无量纲二维快速傅里叶变换进行了用位相元件将双模激光波面校正为矩形波面的计算机设计。讨论了多横模的情况。

关键词: 多模, 位相元件

行了设计, 结果令人满意。

一、前言

光场均匀化问题在高功率激光系统中至关重要。在激光加工、金属强化、激光打靶等应用和实验研究中均需均匀的光照。目前虽有几何棱镜、全息、声光调制等方法可使光场均匀^[1~4], 但从能量转换率、实用性、装置的复杂程度和调整难度来衡量, 它们都或多或少地存在着不足。

最近我们利用插入位相元件方法^[5], 用计算机模拟参数, 采用自洽原理, 成功地完成了单横模高斯光束均匀化的位相元件设计, 该方法具有装置简单、转换率高的特点, 并可进行波面的再补偿。

但实际的激光束并非都是单模。如采用其它方法选单模势必又要增加光路元件, 损失能量, 增加调整难度。为验证我们的计算机模拟设计方法的广泛适用性, 使之更符合实验室条件, 我们对 TEM₁₀ 模的均匀化问题进

二、原理和结果

考虑带有位相信息的复波传播, 如在光路中插入位相元件, 通过该元件后的次波迭加就会改变波振幅即光场的空间分布。由于对输入输出波前要求任意, 这种标量衍射积分是作不出来的(无论解析法还是数值法)。我们在夫朗和费条件下在光路中插一透镜或利用原有的透镜, 使输入输出互为傅里叶变换。开始时将 64 点的离散双模强度分布加上任意设定的位相进行傅氏变换, 然后将变换后的新的位相信息保留, 而把强度分布化换为矩形波形式再进行反变换。第二次将反变换后的位相值保留, 用双模强度分布代替反变换后的幅值再进行正变换, 如此反复, 直至自洽为止。所谓“自洽”, 在理论上是认为反复

收稿日期: 1987年11月22日。

* 国家自然科学基金资助。

变换后原函数(输入)和像函数(输出)的波形均和原设定的一样, 无需强迫代换。实际上基本达到即可(图2和图3) 这种自洽的过程是一种代替解衍射积分的有效办法。

在计算过程中采用无量纲运算以发挥计算机效率并可多方调节各种参数以获取最佳值和缩短自洽次数, 如双模宽度和矩形波宽度都是无量纲纯数。另外计算是二维的。

通过参数调节的模拟实验, 选取矩形波半宽 $W' = 8$, 双模高斯波半宽 $W = 3.5$ 进行了计算。因为 TEM_{10} 模双模特征主要表现在 x 方向上, 故这里仅给出 x 方向的强度和

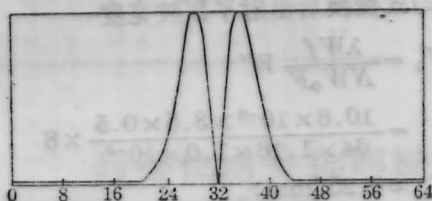


图1 理想的双模强度分布

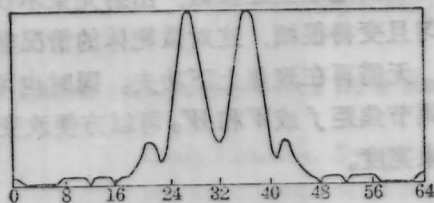


图2 自洽10次后双模强度分布

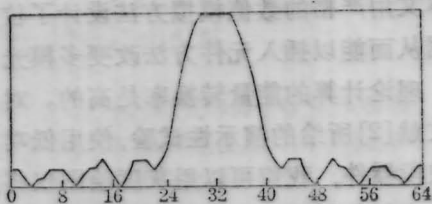


图3 自洽10次后双模场的均匀化分布

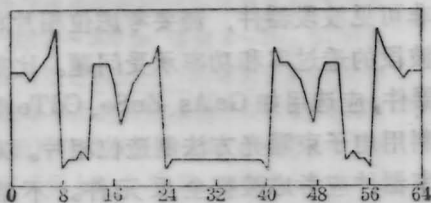


图4 自洽后的 x 方向位相分布

位相分布。图1是理想的强度, 图2是自洽后的双模强度分布, 图3是自洽后的输出场平顶型强度分布。图2的强度分布场通过如图4所示的位相分布的位相片就变为图3所示的平顶波场。实际位相分布是二维的, 图4仅显示了 x 方向, 且可看出位相本身无量纲, 不依出入口场有无量纲而变。由图3看出输出场接近理想矩形。这种平顶波形如用示波器观察一般和矩形波的差别是看不出的, 这是理论设计的优越性。如果要使之接近矩形, 可增加自洽次数。[5]中给出了单模问题自洽8次和自洽20次的结果。8次结果输出波是平顶, 但和理想矩形相差较多, 20次的结果输出非常接近理想矩形。本文是作了10次, 如作20次以上的自洽计算, 输出结果由以上经验可知会更加理想。

三、实验参数选择

对照实验要求的模宽等数据, 需要找出和上述运算之间的关系。另外虽然如图4所示的位相片的分布数据已得出, 但如何定实际位相片的尺寸范围也需求出。一双模高斯光束为

$$\psi(x, y) = \frac{c}{W_0 \cdot F} x e^{-\frac{x^2 + y^2}{W_0^2 \cdot F^2}}, \quad (1-1)$$

$$F = \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1-2)$$

这里 z 为常数, 因为它是在特定的位相片处。 W_0 为束腰半径, λ 为波长, (x, y) 为入射波面。抽样以后的离散双模形式为

$$\begin{aligned} \phi(I, J) = & \left(I - \frac{N}{2} \right) \\ & \times e^{-\left[\left(I - \frac{N}{2} \right)^2 + \left(J - \frac{N}{2} \right)^2 \right] / W^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

(I, J) 为入射面的抽样点坐标, W 为无量纲半宽。据(1)和(2)的对比有

$$I = \frac{N}{2} + W \cdot x / W_0 \cdot F, \quad (3-1)$$

$$J = \frac{N}{2} + W \cdot y / W_0 \cdot F. \quad (3-2)$$

设出射平面坐标为 \$(x', y')\$, 相应的抽样点坐标为 \$(I', J')\$。出射平面同时也是傅里叶像空间, 因而也要定义像空间的频谱坐标 \$(p, q)\$, 可知 \$p = \frac{x'}{\lambda f}\$, \$q = \frac{y'}{\lambda f}\$。由相邻的抽样间隔 \$\Delta I = \Delta J = 1\$, 得对应的 \$T = \Delta x = \Delta y = W_0 \times F / W\$。变换后像函数周期为 \$\frac{1}{T}\$, 在

$$\Delta p = \Delta q = \frac{1}{T}$$

的一个周期内分布了 \$N = 64\$ 个样本点, 其间隔为

$$\Delta I' = \Delta J' = \mu \frac{\Delta p}{N} = \mu \frac{\Delta q}{N} = 1,$$

故比例因子 \$\mu\$ 为

$$\mu = \frac{N}{\Delta p} = \frac{N}{\Delta q} = NT = NW_0 F / W. \quad (4)$$

注意到原像函数中心均是 \$(\frac{N}{2}, \frac{N}{2})\$, 可推出 \$(I', J')\$ 和 \$(x', y')\$ 的关系

$$I' = \frac{N}{2} + \frac{NW_0 F}{W \lambda f} x', \quad (5-1)$$

$$J' = \frac{N}{2} + \frac{NW_0 F}{W \lambda f} y'. \quad (5-2)$$

设位相片尺寸是 \$D \times D\$, 它原则上应是入射波前的大小。故 \$\delta x = \delta y = D\$, \$\delta I = \delta I' = N\$。另设平顶波实际宽度为 \$W'_0\$, 用于计算的无量纲宽度是 \$W'\$, 易知

$$D = \frac{NW_0 F}{W}, \quad (6-1)$$

$$W' = \frac{NW_0 F}{\lambda W f} \cdot W'_0. \quad (6-2)$$

上式代表了模拟参数和实验参数的对应关系。一般波长 \$\lambda\$, 相位片放置位置 \$z\$, 入射波半宽 \$W_0\$。由实际实验条件确定, 出射波宽度也可作出要求, 剩下的 \$W, D, W', f\$ 均可按上式设计尺寸。

四、设计简例

以普通纵向激励的二氧化碳器件为例,

设腔长 \$L = 3\text{m}\$, 端面曲率半径 \$R = 3L = 9\text{m}\$, 且实际光斑大小

$$w = \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{R^2}{L(R-L)} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (7)$$

将 \$\lambda = 10.6 \mu\text{m}\$ 及 \$L, R\$ 值代入得 \$w = 4.64 \times 10^{-3}\text{m}\$。近似取光斑大小 \$w\$ 为实际双模半宽的 4 倍得 \$W_0 = 1.16\text{mm}\$。设位相片置于 \$z = 0.1\text{m}\$ 处, 从(1-2)式可得 \$F\$ 因子近似为 1.0。由(6-1)式, 位相片尺寸

$$D = \frac{64 \times 1.16 \times 10^{-3} \times 1.0}{3.5} \approx 21.2(\text{mm}).$$

由(6-2)式变换后出射平顶波宽度

$$W'_0 = \frac{\lambda W f}{N W_0 F} W' = \frac{10.6 \times 10^{-6} \times 3.5 \times 0.5}{64 \times 1.16 \times 1.0 \times 10^{-3}} \times 8 \approx 0.25(\text{mm}).$$

上式中取透镜焦距为 \$0.5\text{m}\$。从 \$W'_0\$ 的具体数据可看出选取上述参数, 出射光束不仅变得均匀且变得很细, 这对微靶体的情况非常有利, 无需再在聚焦上下功夫。同时也可看到仅调节焦距 \$f\$ 或 \$W\$ 和 \$W_0\$ 可以方便改变出射波束宽度。

五、讨论

本文用严格的数值模拟方法设计了位相片数据从而能以插入元件方法改变多模光场分布, 理论计算的能量转换率是高的。对于诸如文献[2]所给的演示性试验, 使用低功率可见波段器件, 我们可以用灰度绘图仪将数据转换为相息图, 然后漂白处理作成位相片, 这种情况对位相片材料没有什么要求。对高功率非可见波段器件, 需要考虑位相片材料在该波段的透过率和功率承受问题。比如对 \$\text{CO}_2\$ 器件, 应选用如 \$\text{GaAs}, \text{ZnSe}, \text{CdTe}\$ 等窗口材料用电子束曝光方法制造位相片。对大功率器件应考虑镀膜全反元件。不难推断, 本文方法不仅对插入元件的透过方式, 对

(下转第 271 页)

物距,即大端焦点的位置:

$$l_j = \frac{b \operatorname{ch} \alpha + \frac{1}{2} \operatorname{sh} \alpha}{g_0^2 L m_0 \operatorname{sh} \alpha} \quad (17)$$

由(16)式得成像在主面上($\beta=1$)的物距,即大端主面的位置:

$$l_h = \frac{b_1(\operatorname{ch} \alpha - \sqrt{t}) + \frac{1}{2} \operatorname{sh} \alpha}{g_0^2 L m_0 \operatorname{sh} \alpha} \quad (18)$$

因此,大端的焦距为

$$f = l_j - l_h = -\frac{b\sqrt{t}}{g_0^2 L m_0 \operatorname{sh} \alpha} \quad (19)$$

利用 r_1 、 r_2 互换的对称性可得小端的焦点、主点位置和焦距:

$$l_j' = \frac{t(b \operatorname{ch} \alpha - \frac{1}{2} \operatorname{sh} \alpha)}{g_0^2 L m_0 \operatorname{sh} \alpha} \quad (20)$$

$$l_h' = \frac{t[b(\operatorname{ch} \alpha - \sqrt{t^{-1}}) - \frac{1}{2} \operatorname{sh} \alpha]}{g_0^2 L m_0 \operatorname{sh} \alpha} \quad (21)$$

$$f' = \frac{b\sqrt{t}}{g_0^2 L m_0 \operatorname{sh} \alpha} \quad (22)$$

如物距和像距以主点为基准计算,即

$$l = l_0 - l_h \quad (23)$$

$$l' = l_0' - l_h' \quad (24)$$

则(15)式化为如下成像公式(即高斯公式):

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (25)$$

当锥度 m 为零(即 $r_1=r_2$)时,锥形成为

(上接第262页)

反射方式也同样适用。由设计简例部分给出的位相片尺寸在20mm见方的范围,这样的范围内制取 64×64 个位相点对电子束曝光等方法其精度是可完全满足的。特别是电子束曝光,其精度是nm的数量级,制作工艺上不会有原则困难。

本文给出了TEM₁₀模的结果,不难想像TEM₀₁应完全相同。至于TEM₁₁以上的高次模,由于双模情况已被证明且采用的是二维变换,故可推广。但计算量将会增加。可以设想采用多元件组合技巧将高次模逐次降低的变换方式。这样适应性更强。当然将因

圆柱形发散纤维,令 $L \rightarrow \infty$,即用

$$\frac{1}{L} = 0, \quad \frac{b}{L} = g_0$$

以及 $b \ln\left(1 - \frac{z}{L}\right) = -g_0 z$

代入前面公式即可得到柱形发散纤维的有关结果^[3]。如柱形发散纤维的焦距为:

$$f_c' = -f_c = -\frac{1}{g_0 n_0 \operatorname{sh}(g_0 d)} \quad (26)$$

计算比较 f_c' 与锥形的 f' 值可知, $|f_c'| > |f'|$,且当锥度 m 越大时, f_c' 与 f' 之差也越大。因此,在同样纤维厚度下,采用锥形可获得比柱形更大的负光焦度;或者说,满足同样的光焦度要求,用锥形的结构比用柱形的小。此外,用锥形发散纤维与聚焦型纤维组合设计的光学系统,不仅可增大孔径和视场,还可改善其像质,因此,锥形发散纤维元件也将是微型光学成像系统的重要元件之一。

感谢林金豆先生所给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 J. B. Caldwell *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(19), 3345~3350 (1986)
- 2 H. Nishi *et al.*, *Appl. Opt.*, **25** (19), 3340~3344 (1986)
- 3 I. Kitano *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(19), 3336~3339 (1986)
- 4 J. D. Rees, *Appl. Opt.*, **21** (6), 1009~1012 (1982)
- 5 C. Gomez-Reino *et al.*, *Appl. Opt.*, **25** (19), 3418~3432 (1986)
- 6 殷宗敏, *激光*, **9**(2), 65~68 (1982)

材料的吸收会使转换率降低。

由于我们的元件设计就单一波长进行,对多纵模情况例如二个波长的器件,可以设想对每一波长设计一种元件,用二元件的组合来改变激光波面。

参 考 文 献

- 1 P. W. Rhodes, *Appl. Opt.*, **19**, 3545 (1980)
- 2 W. H. Lee, *Opt. Commun.*, **36**, 469 (1981)
- 3 J. P. Girardeau-Montaut, *Opt. Commun.*, **57**, 161 (1986)
- 4 梁向春,陈泽尊, *光学学报*, **5**, 761 (1985)
- 5 李永平,董辉,姚焜, *光学学报*, **8**, 991 (1988)
- 6 徐荣甫,刘敬海, *激光器件与技术教程*(北京工学院出版社), 1986年