

文章编号: 0258-7025(2001)06-0513-05

一种非成像式大功率激光变换系统的 理论研究*

李俊昌

(昆明理工大学激光应用研究所 昆明 650093)

提要 详细研究激光通过光学系统后的分布对深入研究激光与物质相互作用具有重要意义。从任意给定的光束分布出发,较详细地考虑了激光的衍射过程,研究一个已经获得工业应用的激光变换系统。

关键词 激光变换,激光与物质相互作用,光学计算

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Theoretical Study of a High Power Non-image Formation Laser Beam Transformation System

LI Jun-chang

(Laser Application and Research Institute, Kunming University of
Science and Technology, Kunming 650093)

Abstract Detailed analysis of the laser beam distribution after passed optical system is significant to the deep study the interaction of laser beam and material. In this paper, the diffraction of random distribution laser beam passing through an optical system has been analyzed in detail, and an industrial application laser beam transformation system has been given.

Key words laser beam transformation, optical calculation, interaction of laser beam and material

1 引言

激光工业应用研究中,将激光功率密度分布变换为均匀分布是一个重要课题^[1~5]。将光束进行分割再重新组合,特别是将光束分割面振幅的像重新叠加,可以获得较理想的光束分布^[3~5]。利用成像原理,Miyamoto^[4]提出了由两个柱面透镜、一个平行平面反射腔及一成像透镜组成的一种光学系统(见图 1(a)),当激光通过光学系统时,可以在平面反射腔出口的像平面上获得带状均匀光斑。为使光学系统适用于大功率激光器,Caillibotte^[5]将透镜改为等效的金属反射镜,获得了均匀带形光斑(图 1(b)),并利用这种装置对激光表面熔覆作了研究。最近,文献[6]报道了国内研制的一带状光斑变换系统,其装置原理等效于图 1(a)中成像透镜取

出后的非成像式系统。虽然激光经非成像式系统变换后的光斑上具有复杂的结构(图 1(c))^[6],但是,当激光与材料的相互热作用时间较长时,热作用结果主要取决于光斑功率密度分布的局部平均值,在改善激光表面熔覆热处理质量的工作中,这种装置发挥了十分重要的作用。

由于激光通过光学变换系统后在不同空间位置有不同的分布,实际工作中很难实现对激光热作用区的功率密度检测,当入射光束给定后,如果能够理论上预计激光通过光学系统后在不同空间位置的功率密度分布,对准确控制热处理工艺及深入研究激光与物质相互作用具有重要意义。基于对一种成像式方形波导腔均能变换系统的研究^[7],本文从任意给定的光束分布出发,考虑激光的相干性,对文献[6]的激光均能光带变换系统进行讨论。

2 光学系统的几何光学分析

图 2 给出了文献[6]的非成像式光学系统在 xz

* 国家自然科学基金(编号:59671053)和云南省自然科学基金(96E027M)资助项目。

收稿日期:1999-12-01;收到修改稿日期:2000-06-27

及 yz 平面的等效光路图。设计光学系统时,平面反射腔入口距柱面透镜 L_y 的距离为该柱面透镜的焦距,反射腔出口处的光照可以视为来自焦线 S 及反射腔所形成的一序列像 S^* 的共同照射。由于光束同时还通过第二块透镜 L_x 在 L_x 的焦平面上形成另一

条与 S 垂直的焦线,通过光学系统各元件参数及空间位置的适当选择,将能在目标平面上获得 y 方向扩展而 x 方向会聚的带状光斑,并且,由于光斑是线光源 S 及其像 S^* 共同照射结果,光斑沿 y 方向具有较均匀的平均功率密度分布。

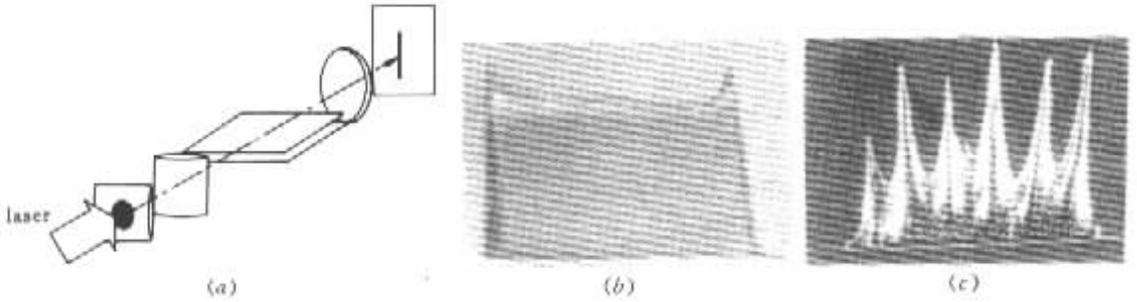


图 1 (a) 带形光斑变换装置 (b) 将透镜改为等效的金属反射镜后,在像平面上获得的有机玻璃烧融孔; (c) 非成像式系统在某工作平面上的有机玻璃烧融孔

Fig.1 (a) Belt light speckle transformation device ; (b) After changing the lens by an effective metal reflecting mirror , gained plexiglass burn-melting hole ; (c) Plexiglass burn-melting hole gained on the non-image formation work-plane

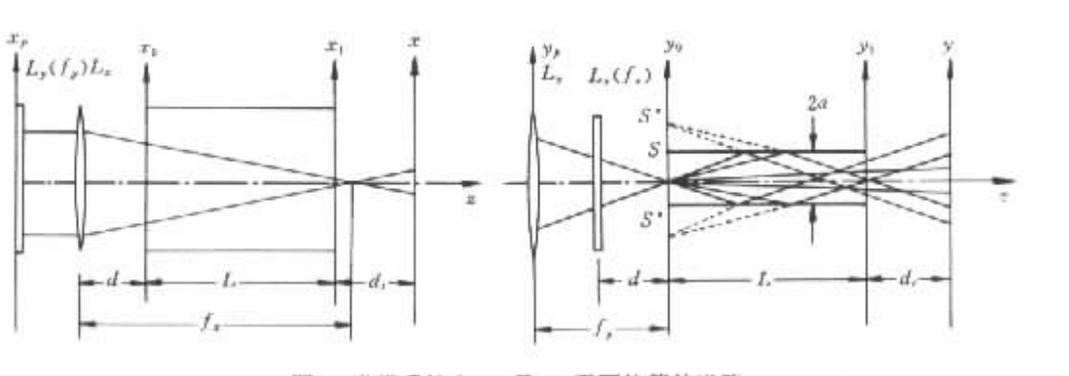


图 2 光学系统在 yz 及 xz 平面的等效光路

Fig.2 Effective optical light route on yz plane and xz plane

3 傅里叶光学对光学系统的研究

设入射激光沿 z 轴传播(见图 2); f_x, f_y 为两块柱面透镜焦距; d 为第二块柱面透镜到平面反射腔入口的距离; L 为平面反射腔沿 z 方向的长度; d_x 为观察平面到反射腔出口的距离; S^* 为平面反射腔对焦线 S 成的虚像; $2a$ 为平面反射腔的间距。为便于定量研究,相关坐标定义如下: x_p, y_p 为透镜 L_y 平面坐标; x_0, y_0 为焦线 S 所在平面(即反射腔入口)坐标; x_1, y_1 为平面反射腔出口平面坐标; x, y 为观察平面坐标。

按照傅里叶光学理论^[7],光学系统后的光传播可以视为平面反射腔入口平面上—序列线光源发出

的柱面波通过反射腔出口的衍射及叠加^[8]。若令平行入射到柱面透镜 L_y 上的激光的振幅为 $U(x_p, y_p)$, 在反射腔出口平面 x_1, y_1 上一共受到焦线 S 及它的 $2N$ 个像发出的光的共同照射,其光波复振幅即为来自 x_0, y_0 上的 $2N + 1$ 个线光源发出的光的相干叠加。以下,先写出 x_0, y_0 平面上坐标为 $y_{0n} = 2na$ 的某焦线发出的光在反射腔出口平面 x_1, y_1 上的复振幅分布

$$U_n(x_1, y_1) = \frac{1}{\sqrt{M_{x0} M_{y0}}} U\left(\frac{x_1}{M_{x0}}, \frac{y_1 - y_{0n}}{M_{y0}}\right) \times \exp\left[\frac{jk}{2(d + L - f_x)} x_1^2 + \frac{jk}{2L} (y_1 - y_{0n})^2\right] \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N) \quad (1)$$

式中, M_{x0} 及 M_{y0} 分别为反射腔出口光阑平面上的光振幅在 x 及 y 方向相对于 $U(x_p, y_p)$ 的横向放大率, 它们满足下述关系

$$M_{x0} = \frac{f_x - L - d}{f_x}; \quad M_{y0} = -\frac{L}{f_y}$$

该列光波在观察平面 xy 上的复振幅即可表示为^[7]

$$V_n(x, y) = \frac{\exp(jkd_t)}{j\lambda d_t} \times \frac{1}{\sqrt{M_{x0}M_{y0}}} \times \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \int_{-a}^a dy_1 U\left(\frac{x_1}{M_{x0}}, \frac{y_1 - y_{0n}}{M_{y0}}\right) \times \exp\left[\frac{jk}{2(d+L-f_x)}x_1^2 + \frac{jk}{2L}(y_1 - y_{0n})^2\right] \times \exp\left\{\frac{jk}{2d_t}[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} \quad (2)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长。

由于观察平面上的复振幅可以视为具有相互垂直的两条焦线的光束辐照结果, 为便于讨论干涉问题, 将该列光波的复振幅重新写为^[8,9]

$$A_n(x, y) = |V_n(x, y)| \exp\left[\frac{jk}{2(d+L+d_t-f_x)}x^2\right] \times \exp\left[\frac{jk}{2(L+d_t)}(y-y_{0n})^2\right] \quad (3)$$

当各光束完全相干并且忽略光束在反射腔内的反射损失时, 观察平面上的激光功率密度分布即为 $2N+1$ 列光束的相干叠加

$$E(x, y) = \sum_{p=-N}^N A_p^*(x, y) \sum_{q=-N}^N A_q(x, y) \quad (4)$$

式中 $A_p^*(x, y)$ 为 $A_p(x, y)$ 的共轭复量。将(3)式代入(4)式得

$$E(x, y) = \sum_{p=-N}^N \sum_{q=-N}^N |V_p(x, y)| |V_q(x, y)| \times \cos\left[\frac{2\pi}{T_{pq}}\left(y - \frac{y_{0p} + y_{0q}}{2}\right)\right] \quad (5)$$

其中,

$$T_{pq} = \frac{L + d_t}{y_{0p} - y_{0q}} \lambda \quad (6)$$

以上结论表明, 叠加光斑将在 y 方向形成间距为 T_{pq} 的若干组干涉条纹。然而, 光束在平面反射腔内传播的过程中, 每次反射不仅会改变光束的偏振状态, 而且还会损失部份光能, 这样, 焦线 S 在 y_0 方向的像 S^* 所发出光波的振幅及相干度事实上随它们距 S 的距离增加而减小。本文仅引入可由实验确定的相干系数 F_{pq} , 衰减系数 F_p 及 F_q 对以上结果作修正。这样(5)式被重新写为^[8,9]

$$E(x, y) = \sum_{p=-N}^N \sum_{q=-N}^N F_{pq} |F_p V_p(x, y)| |F_q V_q(x, y)| \times$$

$$\cos\left[\frac{2\pi}{T_{pq}}\left(y - \frac{y_{0p} + y_{0q}}{2}\right)\right] \quad (7)$$

4 计算参数的确定

4.1 等效透镜焦距及像光源 S^* 数目

为适用于大功率激光的光束变换, 工业生产中通常采用易于实现冷却的金属曲面反射镜来代替透镜。因此, 文献 6 的光学系统是用柱面反射镜制成的离轴系统, 等效透镜焦距的计算应采用光线追迹的方法^[10], 限于篇幅, 不作具体介绍。

若入射光束直径为 D , 根据图 3, 为使 S 下方第 N 个像点 S^* 发出的光线能够通过平面镜出口, 必须满足 $\Delta = \frac{DL}{2f_y} - (2N-1)a > 0$ 。于是得到

$$N \leq \frac{LD}{4af_y} + \frac{1}{2} \quad (8)$$

实际计算时 N 可取不等式右方的整数。

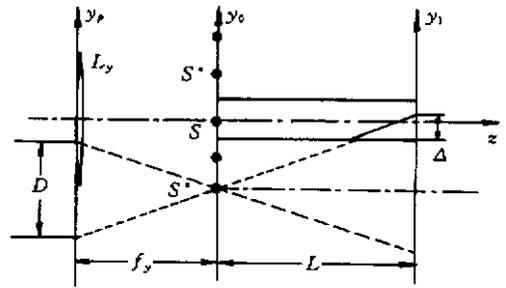


图 3 像光源数目 $2N$ 的确定

Fig. 3 Determination of imagine and light resources number $2N$

4.2 根据实验测量确定相干系数及衰减系数

若所研究的光学系统是在波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的纵向激励轴流大功率 CO_2 激光设备下运行工作, 光束通过光学系统后叠加光束之间的相干性与文献 [11] 的情况相近, 可取

$$F_{pq} = \begin{cases} 1 & (p = q = 0) \\ 0.5 & \end{cases}$$

由于焦线 S 两侧的虚像 S^* 为反射光线反向延长线的交线, 经受 n 次反射的光线将形成 S 两侧的第 n 个像, 像的发光强度即被衰减了 n 次。为简单起见, 可设 $F_n = R^{|n|}$ ($0 < R < 1$)。若光束通过平面反射腔后的能量损失百分率为 ϕ , 通过数值计算求解方程(9)即能确定 R

$$1 - \phi = \frac{\sum_{p=-Nq}^N \sum_{q=-N}^N F_{pq} |R|^p |V_p(x, y)| |R|^q |V_q(x, y)| \cos\left[\frac{2\pi}{T_{pq}}\left(x - \frac{x_{oip} + x_{oiq}}{2}\right)\right]}{\sum_{p=-Nq}^N \sum_{q=-N}^N F_{pq} |V_p(x, y)| |V_q(x, y)| \cos\left[\frac{2\pi}{T_{pq}}\left(x - \frac{x_{oip} + x_{oiq}}{2}\right)\right]} \quad (9)$$

4.3 利用简单数学表达式模拟入射激光分布

以上讨论中,入射激光的功率密度可以任意给

$$P(x_p, y_p) = \frac{4P_0}{\pi w^2(2\eta + 1)} \left\{ \eta \exp\left[-2\frac{(x_p - \Delta x)^2 + (y_p - \Delta y)^2}{w^2}\right] + \frac{x_p^2 + y_p^2}{w^2} \exp\left(-2\frac{x_p^2 + y_p^2}{w^2}\right) \right\} \quad (10)$$

式中, P_0 为激光功率, $w, \eta, \Delta x, \Delta y$ 为待定参数,通过与实际测量的比较(例如取测量值与模拟值均方差的最小值)确定出具体数值。待定参数确定后, (1)式中入射光束振幅即为

$$U(x_p, y_p) = \sqrt{P(x_p, y_p)} \quad (11)$$

定。为给出数值计算实例,设激光功率密度分布为^[11]

为直观起见,令 $w = 5 \text{ mm}, \Delta x = 0.05w, \Delta y = -0.05w$ 图4(a)(b)分别给出 $\eta = 0.3$ 及 $\eta = 0.9$ 时同一标度下由(10)式确定的同功率激光分布形貌。

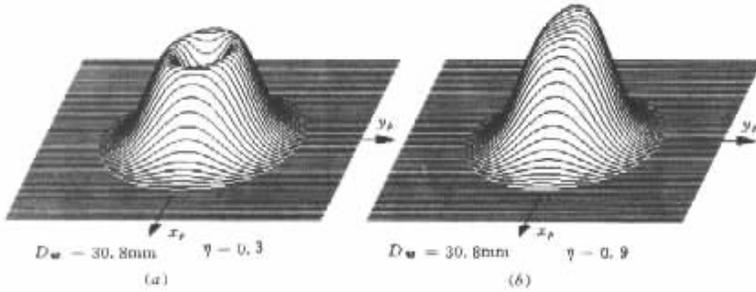


图4 $w = 5 \text{ mm}, \Delta x = 0.05w, \Delta y = -0.05w, \eta = 0.3$ 及 $\eta = 0.9$ 时由(10)式确定的入射光束分布形貌
Fig.4 When $w = 5 \text{ mm}, \Delta x = 0.05w, \Delta y = -0.05w, \eta = 0.3$ (a) and $\eta = 0.9$ (b) the distribution appearance of light beam determined by(10)

5 数值计算及讨论

以上分析已经指出,激光穿过光学系统后,将成为具有两条相互垂直焦线的光束。这样,在不同的空间位置,激光将有不同的功率密度分布。在实际应用中,为获得高强度的光斑,通常将工作平面选择在柱面镜 L_x 的焦平面附近,现对该区域的光能分布进行研究。

设 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}, D = 2w, R = 0.75 f_x = 300 \text{ mm}, f_y = 200 \text{ mm}, d = 100 \text{ mm}, L = 70 \text{ mm}, 2a = 4 \text{ mm}$ 以及设被变换光束的功率密度分别满足图4(a)(b)不难看出,这时 $d_t = 130 \text{ mm}$ 为 L_x 的焦平面位置,图5给出了邻近透镜 L_x 的焦平面 $d_t = 131 \text{ mm}$ 处的叠加光斑功率密度分布。由图可见,在透镜 L_x 的焦平面附近,光束截面为一个具有复杂的干涉及衍射结构的狭窄光带,其强度与分布均与入射光束密切相关,由于图4(a)中入射光束的功率被分散于围绕光束中心的一个环形区域,与功率集聚于中央的(b)相比,叠加光斑在 y 轴

低。

由于叠加光斑具有强烈的干涉结构,对光束质量有重要影响。根据(6)式,干涉条纹的间距与平面反射腔(或各线光源)间距成反比。因此,我们令入射光束满足图4(b),在上述条件下对 $2a = 3 \text{ mm}, 2 \text{ mm}$ 两种情况再作数值模拟,其结果亦以同一标度示于图5中。对比 $2a = 4 \text{ mm}, 3 \text{ mm}$ 及 2 mm 三个光斑可见,当 $2a = 2 \text{ mm}$ 时,叠加光斑上具有间距最宽及幅度最大的干涉条纹,其分布与图1(c)有十分相似的形式。

理论及实验研究表明,当激光与材料相互作用时间较长时,热作用结果主要依赖于光斑功率密度分布的局部平均值,条纹间隔越宽,幅度越大,越不能得到均匀的热作用^[10]。因此,在以上给定的条件下,平面反射腔的间距调节为 4 mm 对热作用的均匀性有利。

当激光功率不同时,同一激光设备的功率密度分布将因模式的改变而发生变化;不同形式的激光设备在同一功率输出时,光束的功率密度分布通常

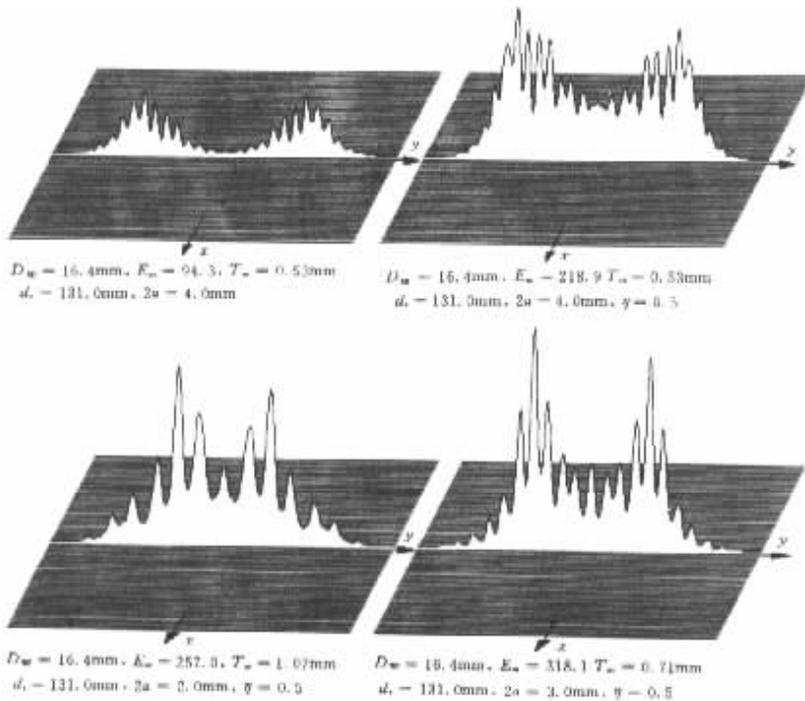


图 5 入射光束分布及平面反射腔间距对变换光斑的影响

Fig.5 Transformation speckle influenced by entrance light distribution and the plane reflecting cavity distance

有较大的差别。因此,为保证光束变换系统的使用质量,应尽可能地了解入射光束及光束通过光学系统变换后的信息。在给定入射光束分布的情况下,本文所进行的研究可以预计光学系统后任意空间位置的激光功率密度分布,可以作为装置实际应用的一个有益参考。

参 考 文 献

- 1 Y. Kawamura, Y. Itagaki, K. Toyoda *et al.*. A simple optical device for generating square flat-top intensity irradiation from a Gaussian laser beam. *Opt. Comm.*, 1983, **48** :44
- 2 J. C. Li, J. Merlin, J. Perez. Etude comparative de differents dispositifs permettant de transformer un faisceau laser de puissance avec une répartition energetique gaussienne en une répartition uniforme. *Revue de Physique Appliquée*, 1986, **21** :425 ~ 433
- 3 Li Junchang, J. Merlin, C. Renard. Theoretical and experimental studies of an optical device for transformation of laser beam in rectangular spot. *Revue de Physique Appliquée*, 1989, **25** :1111 ~ 1118
- 4 I. Miyamoto. Nouvel shaping optics of CO₂ laser beam. LSV Optics', Proceedings of ECO2, The Haques 1990
- 5 Georges Caillibotte. Etude Experimentale de la Refusion Supérieure des Metaux par Laser CO₂ Multikilowatts Continu, Thèse faite au Laboratoire d' Applications des Lasers de Puissance-Unité mixte ETCA-CNRS, 1992, **207** 9223
- 6 X.-C. Yang, X. Zhao, Y.-S. Wang. Optimization of static and linear beam pattern for laser surface modification. *SPIE*, 1999, **3862** 372 ~ 376
- 7 Li Junchang, J. Merlin, C. Renard. Etudes theoriques et expérimentales d' un dispositif optique de transformation de faisceau laser en tache rectangulaire. *Journal of Optics*, 1993, **24** (2) 55 ~ 64
- 8 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. McGraw Hill Book Cy, N. Y., 1968
- 9 Li Junchang, Rogerio Lopes. Christine Vialle at Jean-Francois Sacadura, study of an optical device for energy homogenization of a high power laser beam. *Journal of Laser Application*, 1999, **11** (6) 279 ~ 283
- 10 Li Junchang. A study on the thermal effect of the interference and diffraction fringes of laser beam in the process of laser heat treatment. *Laser Technology*, 1994, **17** (6) 329 ~ 334
- 11 Li Junchang, J. Merlin. The application of the ray tracing to the diffraction calculation of an off-axial laser beam transformation system. *Chines J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25** (7) 637 ~ 643 (in Chinese)