

再论激光宽带聚焦系统

李俊昌

(昆明工学院激光应用研究室)

Redisussion on laser wide-band focusing system
for laser beams

Li Junchang

(Lab. for laser Applications, Engineering Institute of
Kunming, Kuming)

提要: 我们曾经提出并研究过一种光学装置^[1], 它可以将单模高斯激光(TEM₀₀)会聚为带形光斑, 并使光斑沿长度方向具有较均匀的能量分布。本文将讨论另外两种类似的装置形式, 并比较这几种光学装置对激光光束的均能作用。

关键词: 激光束宽带聚焦系统, 高斯光束

一、引言

变激光束能量的高斯分布为均匀分布, 是材料表面激光处理应用研究的重要课题。将光束进行分割并重新组合, 是实现材料表面均匀光辐照的有效措施。对于单模高斯光束, 可以采用将光束对半或对称四瓣分割的方法^[1, 2], 在材料表面迭加成带形或方形均能光斑。研究表明^[3], 将光束平行分割为三瓣再重新迭加, 也能获得较均匀的光斑。我们进一步分析发现, 将光束平行分割为四瓣再迭加, 其光斑具有非常均匀的能量分布。

为实现以上提及的这几种均能方案, 几乎可以采用完全类似的装置形式(参见图1), 因此, 我们有兴趣从理论上比较这几种光斑的光能分布。为简明起见, 我们假设激光为平行光, 并在讨论中应用几何光学近似, 而不涉及文献[1]中描述的光的干涉及衍射效应,

因为对于实际情形, 只要尽可能缩短光束分割面到迭加面之间的距离^[1], 则除了在光斑边沿附近可以观测到衍射的影响外(见[2]图4), 几何光学仍能近似描述光斑内部的光能分布。

二、三种均能方式

本文研究的三种不同的均能方式示于图1, 设 oxy 坐标面与单模高斯光束垂直, 坐标原点与光束中心相吻合。当光束沿三种光学系统的对称轴透过光学系统时, 第一面劈形棱镜使入射光束沿图中虚线分割和折射, 然后, 各瓣折射光再穿过一个由两个柱面垂直配置的组合透镜, 在 x, y 方向分别以不同的倍率放大, 最后, 在预定平面上重新迭加成带状光斑。

设入射高斯光束的半径为 ω_0 , 光能分布

收稿日期: 1988年4月4日。

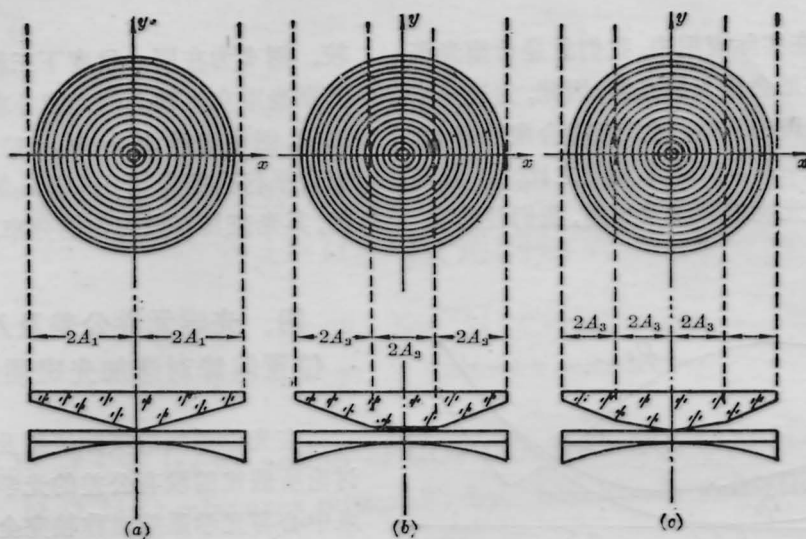


图1 三种均能装置示意图

为 $\exp\left(-2\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}\right)$, 光束通过光学系统后, 在观察平面上三种光斑沿 x, y 坐标轴方向的横向放大率均为 M_x, M_y , 我们仍用 oxy 表示观察平面的坐标, 并令 II_1, II_2, II_3 顺序代表这三种迭加光斑在迭加平面上的光能分布, 利用文献[1]的结论, 可以得到:

$$II_i = \text{rect}\left(\frac{x}{2A}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{y}{2B}\right) \times \frac{1}{M_x M_y} \cdot \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_y^2}\right) \cdot I_i(x, A) \quad (1)$$

($i=1, 2, 3$)

其中

$$I_1(x, A) = \exp\left[-2\frac{(x-A)^2}{\omega^2}\right] + \exp\left[-2\frac{(x+A)^2}{\omega^2}\right] \quad (2)$$

$$I_2(x, A) = \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega^2}\right) + \exp\left[-2\frac{(x-2A)^2}{\omega^2}\right] + \exp\left[-2\frac{(x+2A)^2}{\omega^2}\right] \quad (3)$$

$$I_3(x, A) = \exp\left[-2\frac{(x-A)^2}{\omega^2}\right] + \exp\left[-2\frac{(x+A)^2}{\omega^2}\right]$$

$$+ \exp\left[-2\frac{(x-3A)^2}{\omega^2}\right] + \exp\left[-2\frac{(x+3A)^2}{\omega^2}\right] \quad (4)$$

式中, $2A, 2B$ 分别为光斑沿 x, y 方向的宽度, 而 $\omega_y = M_y \omega_0$ 以及 $\omega = M_x \omega_0$.

以上结论表明, 单模高斯光束通过光学系统后, 将形成长、宽分别为 $2A$ 及 $2B$ 而在 y 轴方向保持高斯分布的带状光斑。为比较三种光斑沿 x 轴方向的光能分布, 只需对(2)、(3)、(4)式进行讨论。为此, 我们定义光斑的 x 轴向对比度:

$$D(A) = \frac{[I_{\max}(A) - I_{\min}(A)]}{[I_{\max}(A) + I_{\min}(A)]}$$

式中 I_{\max} 以及 I_{\min} 分别表示 x 轴向光斑内光能分布的极大值和极小值。

根据(2)、(3)、(4)式, 由数值计算求得三种光斑的 x 轴向对比度随光斑宽度参数 A 的变化曲线如图2。由图可见, 三种均能方式均可能获得沿 x 方向均能分布的带状光斑, 并且, 三种光斑的 x 轴向对比度极小值分别为:

$$D_1(0.552 \omega) \approx 1.42 \times 10^{-2}$$

$$D_2(0.445 \omega) \approx 1.29 \times 10^{-2}$$

$$D_3(0.411 \omega) \approx 5.70 \times 10^{-4}$$

另外,在实际应用中,我们总是希望光斑内尽可能多地会聚入射光能,因此,为进一步考查三种光斑的质量,定义光能会聚效率 η 为光斑内光能与高斯光束总能量之比,若忽略光学元件对光能的吸收及反射,我们显然有

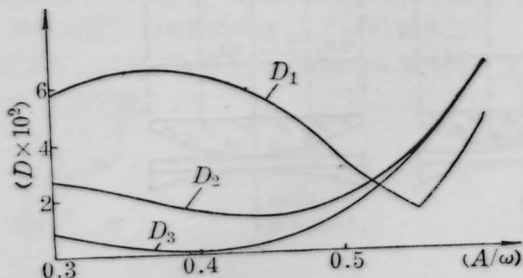


图2 三种光斑 x 轴向对比度随光斑宽度的变化曲线

$$\eta_i \approx \frac{\int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-l_i}^{l_i} \exp\left(-2\frac{x^2+y^2}{\omega^2}\right) dx}{\iiint_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-2\frac{x^2+y^2}{\omega^2}\right) dx dy} \quad (i=1, 2, 3)$$

式中 $2l_i$ 为光束的有用截面宽度(参考图1)。分别将 $l_1=0.552\omega \times 2$, $l_2=0.445\omega \times 3$, 以及 $l_3=0.411\omega \times 4$ 代入上式求得:

$$\eta_1 \approx 97.2\%$$

$$\eta_2 \approx 99.2\%$$

$$\eta_3 \approx 99.9\%$$

显而易见,第三种均能方式应具有更好的光斑质量。

三、几何光学近似下的光斑能量分布

为直观起见,令 $M_x=1.5$, $M_y=0.1$, 对于三种均能方式,我们分别选择 $A_1=0.552\omega_0$, $A_2=0.445\omega_0$ 以及 $A_3=0.411\omega_0$ 。根据数值计算,由图3(a)、(b)、(c)对应地给出了几何光学所预见的带状光斑的光能分布形态。很明显,三种均能装置均可获得沿 x 轴方向能量分布较均匀的光斑。作为进一步比

较,图4为在同一尺度下三种光斑以及入射高斯光束在 x 轴上的光能分布曲线(为简化比较,图中选择 $M_x=M_y=1$)。显然,将高斯光束平行分割为宽 $0.411\omega_0$ 的四瓣再进行迭加,其光斑具有最均匀的分布。

四、光学元件公差及入射光束位置偏斜对迭加光斑质量的影响

在光学系统的实际研制及使用中,以上讨论所假定的没有公差的光学元件、入射光束中心与光学系统对称轴完全吻合等理想条件是无法满足的,事实上还可能出现其它形式的偏差。因此,有必要研究各种偏差对迭加光斑的负作用。但限于篇幅,以下只对分

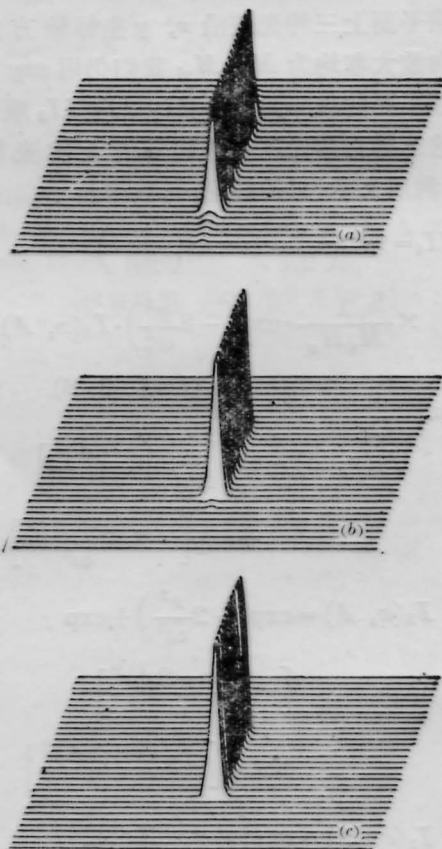


图3 三种带状光斑的光能分布

(本图绘出了光学元件宽度大于图1中最外一条分割线时高斯光束边缘对迭加光斑的影响)

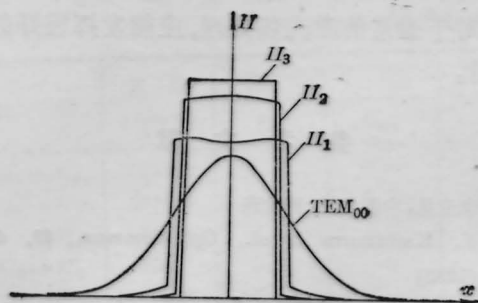


图4 入射高斯光束以及三种光斑沿 x 轴向的光能分布比较
割棱镜的几何精度以及入射光束的平行偏移这两个问题进行简单讨论。

(1). 分割棱镜的几何精度

在光学系统中, 劈形分割棱镜起着将单模高斯光束对称分割、折射并重新组合的主要作用。因此, 分割棱镜相对于 y 轴(参见图1)较好的对称性是完成上述任务的基本保证。在这个前提满足的情况下, 分析图2可知, 对比度曲线 D_2 、 D_3 在极小值附近呈较平坦形态(例如, 当满足 $0.38 < A/\omega < 0.5$ 时, 装置2的光斑 x 轴向对比度仍在2%以下; 而在 $0.3 < A/\omega < 0.48$ 区间, 装置3的光斑 x 轴向对比度均小于1%), 因此, 第2、3两种装置允许分割棱镜的折射面宽度或者入射高斯光束半径在一定范围内变化。虽然, 对装置1而言, 曲线 D_1 的极小值附近有较敏感的变化, 但其分割棱镜的折射面事实上可以保持较大的宽度, 我们总可以根据实际情况, 选择两束折射光的最佳迭加平面位置, 获得均匀的光斑。

此外, 很容易看出, 分割棱镜折射面的倾角偏差将引起所期望的迭加平面沿系统对称轴平移, 因此, 折射面倾角公差的限定, 将主要根据激光处理表面到光学系统之间距离的可调节范围来确定。当然, 折射面倾角公差的限定对于第三种装置要苛刻一些, 因为两组折射面倾角的变化应相互制约, 以保证仍能找到四条光束完善迭加的平面。

(2). 入射光束的平行偏移

设在入射平面坐标系中入射光束中心的实际坐标为 $(\Delta x, \Delta y)$ 。于是, 入射光束的能量分布表为 $\exp\left[-2\frac{(x-\Delta x)^2+(y-\Delta y)^2}{\omega_0^2}\right]$, 对照(1)式, 我们可以求得迭加光斑的光能分布

$$II_i = \text{rect}\left(\frac{x}{2A}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{y}{2B}\right) \cdot \frac{1}{M_x M_y} \times \exp\left[-2\frac{(y-M_y \Delta y)^2}{\omega_y^2}\right] \times I_i(x-M_x \Delta x, A) \quad (5)$$

($i=1, 2, 3$)

由此可见, 入射光束沿 y 方向的平移偏差仅仅引起 y 方向上光能分布的简单平移, 对光斑质量不发生影响。然而, 考查 $I_i(x-M_x \Delta x, A)$ 的表达式(参考(2)、(3)、(4)式)可知, x 方向的平移偏差却直接影响到光斑沿 x 轴向的能量分布。设 $\Delta x=0.1\omega_0$, $\Delta y=0$ 以及 $M_x=M_y=1$, 图5在同一尺度下绘出了入射高斯光束的平移偏差对三种光斑在 x 轴上光能分布的影响。由图可见, 装置1对这种偏差最为敏感, 相对而言, 装置3的迭加光斑则仍然表现出较好的 x 轴向均匀度。因此,

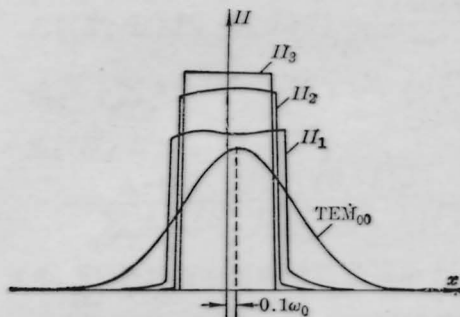


图5 入射高斯光束位置偏移对光斑能量分布的影响
在实际使用中, 我们可以根据对光斑均匀度的要求, 选择相应的装置形式, 并给定 x 轴向对比度的限定值, 然后利用(5)式确定 Δx 的最大容许范围。

五、结 论

应该指出, 即使可以将各种偏差作了十

分满意的控制,由于光的干涉和衍射效应,我们事实上不可能获得几何光学所预言的、如图3所示的如此完善的光斑^[3],但是,从克服衍射对光斑均匀度不良影响的角度而言,尽可能减小光束从分割面到迭加面间的传播距离,将有助于提高光斑质量。当然,为避免来自于激光处区域材料气化等喷溅物对光学系统的污染,传播距离的减小会受到一定的限制。因此,作为再进一步改善光斑质量的途径,可以考虑研制相干光成像系统,让光束分割面上各瓣光场的像进行迭加^[4],我们将可以获得足够满意的光斑。但本文所讨论的这

几种宽带聚焦系统具有非常简单紧凑的结构,对于通常的激光热处理,应能发挥较好的作用。

参 考 文 献

- 1 李俊昌,中国激光,待发表
- 2 Y. Kawamura *et al.*, *Opt. Commun.*, **48**, 44 (1983)
- 3 Roy J. Bruno, K. C. Liu, *Laser & Application* (4), 91(1987)
- 4 J. C. Li(李俊昌) *et al.*, *Revue de Phys. Appl.*, **21**, 425(1986)