

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0343-03

# 激光初始光场的强度分布特性对远场能量集中度的影响

万敏 苏毅 张卫

(中国工程物理研究院应用电子学所, 绵阳 621900)

**摘要** 激光初始光场的强度分布特性在一定条件下将影响其远场能量集中度。讨论了空心束的远场光强分布特性, 并提出用强度非平整度因子 UE 来描述随机初始光场的强度分布特性, 强度的深度调制将导致能量集中度的下降。高能激光束强度的不均匀分布导致其近场热晕效应类似偏转棱镜, 引起了远场光束的偏转, 有风条件将大大缓解远场光束的偏转。

**关键词** 强度分布特性, 能量集中度, 热晕

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A

## Influence of Initial Intensity Distribution on Laser Energy Concentration in the Far Field

WAN Min SU Yi ZHANG Wei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900)

**Abstract** Initial laser intensity distribution characteristics will affect energy concentration in the far field under some certain conditions. The intensity distribution characteristics of annular beam in the far field is studied. Intensity nonuniformity factor UE is put forward to describe the initial random intensity distribution. For high power laser, the intensity nonuniformity will cause the deflection of the beam in the far field while no wind.

**Key words** intensity distribution characteristics, energy concentration, thermal blooming

### 1 引言

激光束的强度分布特性受激光谐振腔及光学器件加工精度的影响, 既非平面束, 又非基模高斯束, 激光束的强度分布特性必然影响远场的能量集中度, 但由于强度分布特性的影响较小, 人们的注意力主要集中到了光束相位的分析和校正上。本文就初始光束的强度分布特性对远场能量集中度的影响进行了理论分析和数值计算。

### 2 初始光场强度分布不均匀对远场能量集中度影响的计算与分析

我们对空心束和初始光强为随机分布的光束进行了解析分析和数值计算。其中使用菲涅耳-基尔霍夫衍射公式进行计算。

#### 2.1 空心束的远场光强

设遮拦比为  $e = a_i/a_o$  ( $a_i$  为内径,  $a_o$  为外径) 的空心平面束, 其衍射场的强度分布为:

$$\begin{aligned} |I_2(\theta)|_{\text{obs}} &= |FT[E_1(x_1, y_1)]|^2 = \\ I_0 &\left[ 2 \frac{J_1(ka_0\theta)}{ka_0\theta} - 2e^2 \frac{J_1(kea_0\theta)}{kea_0\theta} \right]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 引入角半径  $\theta = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}/z$  并以  $I_0$  为中心光强。因此有空心束与实心束衍射场的峰值强度之比为(设初始束外径相等, 初始场振幅相等):

$$\frac{I_2(0)|_{\text{obs}}}{I_2(0)|_{\text{solid}}} = (1 - e^2)^2 \quad (2)$$

为了更直观地表示空心束遮拦比对衍射特性的影响, 下面给出遮拦比  $e$  分别为 0, 0.5, 0.8 时, 初始功率密度相等空心束的远场光强分布二维图, 如图 1 所示。图 2 给出了占总功率 84% 时的角半径  $\theta_1$ , 占总功率 60% 时的角半径  $\theta_2$  随遮拦比  $e$  的变化。

图中  $\theta_1$  曲线的突变源于远场光斑的第二暗环处的一个跃变,而  $\theta_2$  曲线的两处突变则分别源于远场光斑第一暗环和第二暗环处的跃变。由曲线图可见,随着空心束中空程度的增大,远场光斑逐步弥散,光束质量迅速下降。可见,空心束斑中心强度低于实心束,随  $e$  增大而减小;空心束中心亮斑(第一极小内)半径比实心束小,且随  $e$  增大而越来越小。能量从中心向外环扩散。

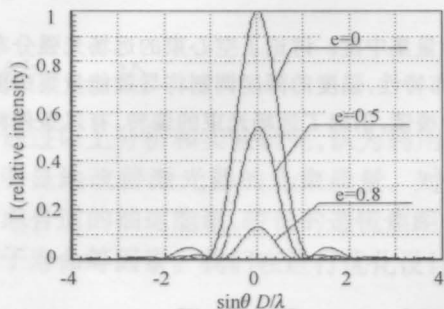


图1 远场横向光强分布  
Fig.1 Intensity distribution in the far field

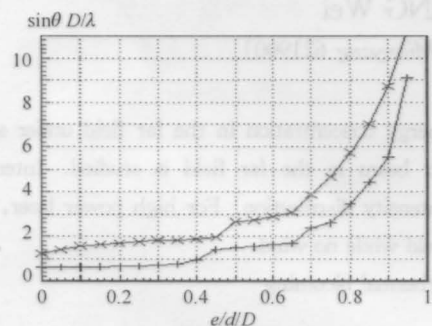


图2  $\sin\theta D/\lambda$  随  $e$  的变化( $\times$ 代表  $\theta_1$ ,  $+$ 代表  $\theta_2$ )  
Fig.2  $\sin\theta D/\lambda$  vs  $e$  ( $\times$  for  $\theta_1$ ,  $+$  for  $\theta_2$ )

### 2.2 强度为随机分布的初始光场的远场光强及强度非平整度因子

我们对随机光场的强度分布特性定义一个特征参数,强度非平整度因子  $UE$ :

$$UE = \sigma_I / \langle I \rangle \quad (3)$$

其中,  $\sigma_I$  代表强度起伏均方根值,  $\langle \rangle$  表示平均。为寻找任意初始强度分布光束的远场强度分布规律,以强度起伏空间截止频率  $f_{r, \max}$  和强度非平整度因子  $UE$  为变量,计算强度为高斯随机分布的初始光场的远场光强,得到  $f_{r, \max}$  和  $UE$  对远场能量集中度的影响,其中远场能量集中度以光束质量因子  $\beta$  表征,  $\beta$  定义为实际光束与理想平面光束在远场的84% 环围能量半径之比。如图3给出了  $\beta$  随  $UE$  的变化,其中  $f_{r, \max}$  分别取:  $1/D, 2/D, 3/D, 4/D, 5/D, 10/D,$

$15/D, 20/D$  ( $D$  为光束口径)。图3为任意抽取的一个随机结果。

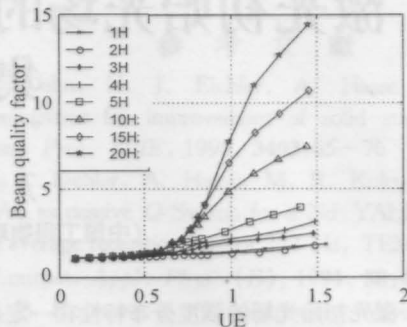


图3  $\beta$  随  $UE$  的变化(图中标注的是  $f_{r, \max}$ )  
Fig.3  $\beta$  vs  $UE$  (for various  $f_{r, \max}$ )

由图3可知,随着  $UE$  的增大,  $\beta$  增大,即能量集中度呈下降趋势。当  $UE$  大于0.6时,  $f_{r, \max}$  不同,  $\beta$  有很大的变化,即初始光强呈高频起伏,则其远场光斑发散较大。可见,  $UE$  标志了中心能量向外围的转移份额,  $f_{r, \max}$  标志了中心能量向外围转移的最大距离。当  $UE$  较小时,即使  $f_{r, \max}$  很高,由于中心能量向外围的转移份额少,对84%的环围能量半径影响也较小;当  $UE$  较大时,中心能量向外围的转移份额多,84%的环围能量半径就随着能量转移距离的增大而增大,也就是随着  $f_{r, \max}$  的增大而迅速增大。对于  $UE$  小于0.6的情况,由于不同  $f_{r, \max}$  的计算结果很接近,我们做了一拟合曲线,如图4所示,其拟合误差的均方根值为0.048。近似认为  $SR \approx 1/\beta_2$ , 如果要求  $SR \geq 0.8$ , 即  $\beta \leq 1.118$ , 则要求  $UE \leq 0.3$ 。

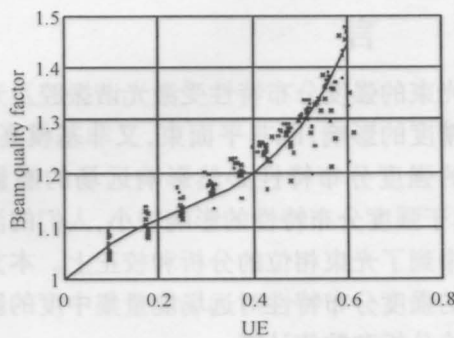


图4  $\beta$  随  $UE$  变化的拟合曲线  
Fig.4  $\beta$  vs  $UE$  (fitting curve)

### 3 高能激光束强度分布不均匀对远场的影响

当高能激光束强度分布不均匀时,将由于近场热晕问题而引起远场光束的偏转,从而导致远场靶上能量集中度的下降。假设高能激光束强度分布

为:

$$I = \begin{cases} I_0 \left( 1 + \frac{f \cdot r}{a_0} \right), & a \leq |r| \leq a_0 \\ 0, & |r| > a_0 \text{ or } |r| < a_i \end{cases} \quad (4)$$

取非对称倾斜因子  $f$  为  $x$  向, 其取值为  $f_x$ , 求强度非平整度因子  $UE$ :

$$UE = \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} \int_{a_i}^{a_0} (I - \bar{I})^2 r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_{a_i}^{a_0} r dr d\theta}} \bar{I}^{-1} = \frac{f_x}{2} \sqrt{1 + e^2} \quad (5)$$

取遮拦比  $e = 0.5$ ,  $f_x$  分别为 1 和 0.8 时,  $UE$  分别为 0.56 和 0.447。令初始功率为  $5 \times 10^4$  W, 激光波长  $\lambda_0 = 1.315 \mu\text{m}$ , 近场光束直径  $D = 0.12$  m, 近场传输距离取 10 m, 吸收系数  $\alpha = 4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , 风速分别取 0 m/s 和 0.5 m/s 情况。激光远场光斑峰峰值的偏转角分别如图 5 所示。在无风情况下 (风速 0 m/s), 高能激光束初始强度的不均匀分布导致了近场大气介质的不均匀加热, 这时近场热晕效应

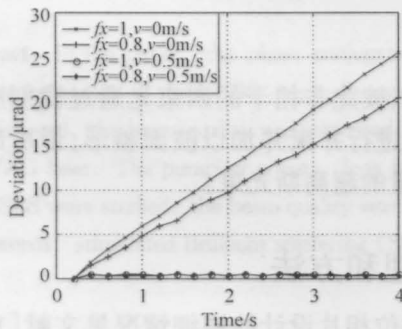


图 5 远场光斑峰峰值偏转角随时间的变化

Fig. 5 Peak intensity in the far field vs time

类似偏转棱镜, 将引起远场光束的偏转, 使之不能会聚到预定目标处, 从而导致远场靶上能量集中度的下降。非对称倾斜因子  $f_x$  越大, 偏转也越大,  $f_x = 1$  时, 远场光斑峰峰值的偏转角为  $26 \mu\text{rad}$ ;  $f_x = 0.8$  时, 远场光斑峰峰值的偏转角为  $20 \mu\text{rad}$ 。在风速为 0.5 m/s 时, 由于风带走了强光加热了的大气介质, 近场热晕效应减小, 从而大大缓解了远场光束的偏转。

另外, 高能激光束还将引起近场光学器件的加热, 如果  $UE$  非常大, 存在一些随机的强度尖峰超过近场光学器件的承受阈值, 将引起近场光学器件的变形甚至损坏, 光束传输路径受到破坏, 从而也将导致远场能量集中度的下降。为此, 应针对光学器件对光强的承受能力提出一个强度阈值, 限定近场高能激光束的强度峰值必须小于该强度阈值。

## 4 小 结

综上所述, 初始光场的强度分布特性在一定条件下将影响其远场能量集中度。强度的深度调制将造成远场能量的发散, 导致能量集中度的下降; 而高能激光强度的不均匀分布可能会由于近场热晕导致远场光斑偏转, 并可能导致光学器件的变形甚至损坏, 从而造成远场能量集中度的下降。

## 参 考 文 献

- 1 苏毅, 万敏. 空心束光束质量评价. 强辐射技术论文集(1995~1996), 1997
- 2 朱自强, 王仕番, 苏显渝. 现代光学教程. 成都: 四川大学出版社, 1990
- 3 万敏, 苏毅, 张凯等. 激光热晕补偿数值模拟计算与实验. 红外与激光工程, 1996, 25(1): 51~59