

文章编号: 1001-3806(2002)02-0108-03

超高斯光束经光阑球差透镜后的光束质量评价*

卿与三^{1,2} 吕百达¹

(¹四川大学激光物理与化学研究所,成都,610064) (²宜宾学院物理系,宜宾,644007)

摘要: 以桶中功率(PIB)、 β 参数和 η 参数为激光光束质量评价参数,对超高斯光束经有方环光阑球差透镜后的光束质量作了详细的研究。大量数值计算和物理分析表明,超高斯光束经有方环光阑透镜后的光束质量与方环遮拦比、透镜球差和超高斯光束的阶数等因素有关。采用适当的负球差透镜,在实际焦面上可得到最大的 PIB, η 值和最小的 β 值,从而获得比无球差透镜更好的光束质量,甚至使 $\beta < 1$ 。

关键词: 超高斯光束;方环光阑;桶中功率; β 参数; η 参数

中图分类号: O435 **文献标识码:** A

Beam quality characterization of super-Gaussian beams passing through a spherically aberrated lens with an annular rectangular aperture

Qing Yusan^{1,2}, L Baida¹

(¹ Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(² Department of Physics, Yibin College, Yibin, 644007)

Abstract: In the paper, the power in the bucket (PIB), β and η parameters are chosen as criteria to characterize the laser beam quality in the far field, then the beam quality of super-Gaussian beams passing through a spherically aberrated lens with an annular rectangular aperture is studied. It is shown by a great number of numerical calculation results and physical analyses that the beam quality depends on the obscure ratio of the rectangular aperture, spherical aberration of the lens and the order of the super-Gaussian beam. If a suitable lens with negative spherical coefficient is selected, a better beam quality at the real focal plane can be obtained. Namely, larger PIB and η , smaller β , even β smaller than 1.

Key words: super-Gaussian beam; annular rectangular aperture; power in the bucket (PIB); β parameter; η parameter

引 言

光束传输因子(亦称 M^2 因子)综合考虑了光束的近场和远场的影响,并且在理想光学系统中是一个传输不变量,已成为国际激光界评价光束质量的一个参数。然而,无论 M^2 因子理论本身,或是实验测量中,都有一系列问题尚待解决。因此,针对不同的实际应用目的,选用不同参数评价光束质量仍是一个值得认真研究的问题。在高功率激光技术中,有时遇到环状矩形光束,它可以是矩形域中非稳腔的输出光束,也可以由矩形光束经方环光阑后产生,并且常有位相畸变。我们从实用观点,以桶中功率、 β 参数和 η 参数作为远场光束质量的评价参数,对一类典型的平顶分布光束——超高斯光束经有方环

光阑球差透镜后的光束质量做了详细的数值计算和分析,所得结果对实际工作有参考价值。

1 超高斯光束经有方环光阑球差透镜后 PIB, β 参数和 η 参数的计算公式

设入射面处超高斯光束的场分布为:

$$U(x', y', 0) = \exp[-(x'/w_0)^n] \times \exp[-(y'/w_0)^n], (n = 2, 4, 6, \dots) \quad (1)$$

式中, w_0 为超高斯光束的束腰半宽度, n 为超高斯光束的阶数($n \geq 2$), 当 $n = 2$ 时为熟知的基模高斯光束。

实际光束在产生和传输过程中或多或少出现振幅调制和位相畸变。其中尤以位相畸变对光束行为影响严重。我们以球差为例进行研究。设一超高斯光束入射到球差透镜上,则会出现波前畸变。球差对光束的影响用相位因子 $\varphi(x, y)$ 描述^[1]:

$$\varphi(x, y) = \exp[-ikC_4(x^4 + y^4)] \quad (2)$$

式中, C_4 称为球差系数。 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波

* 国家高技术光束控制重点实验室资助项目。

作者简介:卿与三,男,1943年6月出生。副教授。现从事教学和激光技术研究。

激光技术 2001-01-02;收到修改稿日期:2001-02-22

长。

在直角坐标系下,入射场为 $U(x', y', 0)$ 的超 高 斯 光 束 经 有 方 环 遮 拦 球 差 透 镜 后 的 传 输 行 为 用 Collins 公式表示为^[2]:

$$U(x, y, z) = -\frac{ik}{z} \exp\left[-\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \left\{ \int_{-a}^a \int_{-a}^a U(x', y', 0) \varphi(x', y') \exp\left[-\frac{ik}{2z} \times \left[\left(1 - \frac{z}{f}\right)(x'^2 + y'^2) - 2(xx' + yy') \right] \right] dx' dy' - \int_{-a}^a \int_{-a}^a U(x', y', 0) \varphi(x', y') \exp\left[-\frac{ik}{2z} \times \left[\left(1 - \frac{z}{f}\right)(x'^2 + y'^2) - 2(xx' + yy') \right] \right] dx' dy' \right\} \quad (3)$$

式中, b, a 分别为方环内、外边长之一半, $\varepsilon = b/a$ 为方环的遮拦比, z 为从透镜到考察面的距离, f 为透镜焦距。

将(1)式和(2)式代入(3)式,可求出超 高 斯 光 束 通 过 有 方 环 光 阑 球 差 透 镜 后 的 场 分 布 $U(x, y, z)$, 进而得到光强分布 $I(x, y, z)$ 为:

$$I(x, y, z) = U(x, y, z) U^*(x, y, z) \quad (4)$$

1.1 PIB

PIB 表示远场光束的能量集中度,可用它来描述远场光束质量^[3]:

$$PIB = \frac{\int_{-\infty}^d \int_{-\infty}^d I(x, y, f) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, f) dx dy} = \frac{\int_0^d \int_0^d I(x, y, f) dx dy}{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} I(x, y, f) dx dy} \quad (5)$$

式中, d 为在远场(后焦面)所取方形域的半边长, $I(x, y, f)$ 为后焦面上的光强。将(4)式代入(5)式可求出所取远场方形域内的 PIB。需要说明的是由于存在焦移^[4],实际焦面与几何焦面并不重合,在计算实际焦面上的 PIB 时,应先利用(4)式计算出轴上最大光强点的位置 z_{max} ,用 z_{max} 代替(5)式中的 f 。取(4)式中的 $C_4 = 0$ 则得无球差时的 PIB。

1.2 β 参数

在实际工作中,常用 β 参数评价光束质量。相同条件下, β 越小光束质量越好。 β 定义为^[5]:

$$\beta = \sqrt{\sigma/\sigma_0} \quad (6)$$

式中, σ, σ_0 分别为当 $PIB = 63\%$ 时在远场实际光束和理想光束(比较基准)对应焦斑面积。针对所讨论

的环形光束,我们分别以无球差的实心 and 空心光束作为比较基准。 β_1 为将与所评价超 高 斯 光 束 束 宽 和 阶 数 相 同 的 实 心 光 束 作 为 理 想 光 束; β_2 为 与 所 评 价 超 高 斯 光 束 束 宽、阶数和遮拦比相同的空心光束作为理想光束。物理上, β_1 表示与理想实心光束相比较,实际环状光束的衍射极限倍数,而 β_2 则是针对输出环状光束的激光器实际达到光束质量的量度。

1.3 η 参数

实际工作中若只关心远场主瓣内的功率含量,则可用 η 参数描述光束质量。 η 为在远场中心主瓣内包含的功率(能量)占总功率(能量)的百分比:

$$\eta = \frac{\int_{-c}^c \int_{-c}^c |U(x, y, f)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |U(x, y, f)|^2 dx dy} \quad (7)$$

式中, c 为中心主瓣零点到中心的距离。同理,在计算实际焦面上的 η 值时,用 z_{max} 代替(7)式中的 f 。

2 数值计算和分析

为研究超 高 斯 光 束 经 有 方 环 遮 拦 球 差 透 镜 后 在 几 何 焦 面 和 实 际 焦 面 上 的 PIB 的 变 化 规 律, 我 们 做 了 大 量 的 数 值 计 算, 其 主 要 结 果 总 结 于 图 1~ 图 4, 所 用 参 数 为 $f = 200\text{mm}$, $w_0 = 0.7\text{mm}$, $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ 。

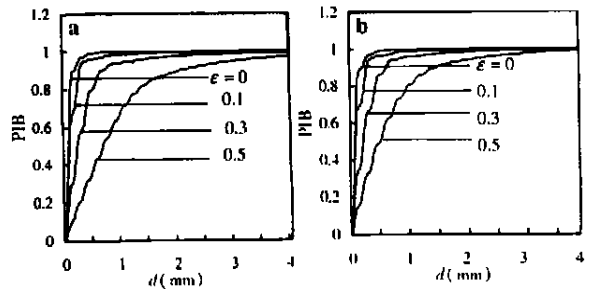


Fig. 1 PIB at the geometrical focal plane as a function of obscure ratio ε

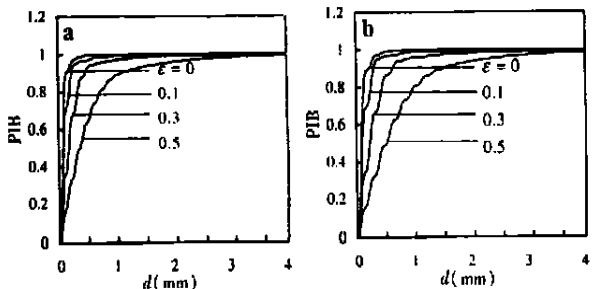


Fig. 2 PIB at the actual focal plane as a function of obscure ratio ε
a- $C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$ b- $C_4 = 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$

由图 1~ 图 4 可见,超 高 斯 光 束 经 有 方 环 光 阑 的 无 球 差 透 镜 后 在 远 场 的 PIB 值 与 方 环 的 大 小 和 遮 拦 比、超 高 斯 光 束 的 阶 数 以 及 透 镜 的 球 差 系 数 等

因素有关。图1和图2表明,在其它3个量一定的条件下,无论是正球差、负球差还是无球差透镜,超高斯光束在几何焦面上的PIB均随遮拦比的增大而减小。在实际焦面上亦是如此。说明随着方环遮拦比的增大,超高斯光束光束质量变差。图3表明,在几何焦面上,球差系数绝对值相同的正负球差透镜的PIB曲线重合;而在实际焦面上,绝对值相同的正负球差透镜对应的PIB曲线不重合,负球差的PIB最大,无球差的PIB次之,正球差的PIB最小。这说明正球差使光束质量变差,而选用合适的负球差透镜可以增加能量集中度,使光束质量变好。图4表明,超高斯光束经无球差透镜后的PIB值随着光束的阶数增大而减小。

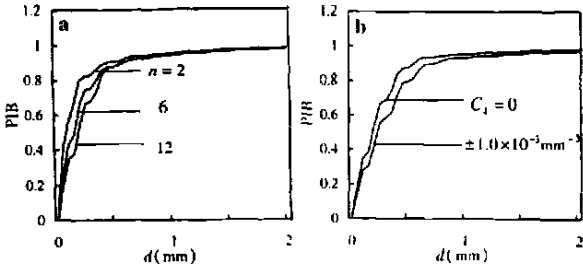


Fig. 3 PIB (a) at the geometrical focal plane and (b) at the actual focal plane vs spherical aberration coefficient C_4 , the calculation parameters are $\epsilon = 0.3$, $a = 1.5\text{mm}$, $n = 12$

利用(6)式对 $n = 12$ 的超高斯光束经不同遮拦比 ϵ 、不同球差系数 C_4 的方环光阑球差透镜后光束的 β 参数的计算结果总结于表1。从表1可看出,超高斯光束经有方环光阑球差透镜

后,光束的 β 值随方环遮拦比的增大而增大。当 ϵ 一定时,在几何焦面上,正负球差透镜的 β 值相同;而在实际焦面上负球差透镜的 β 值小于正球差透镜,甚至出现 $\beta_1, \beta_2 < 1$ 的值。从对 β 值的分析也可看出,选取适当的负球差透镜可得到比无球差透镜能量集中度更高的光束。

表2是利用(7)式计算得出 $n = 12$ 的超高斯光束经有方环光阑球差透镜后的 η 参数。可以看出,几何焦面和实际焦面上的 η 均随着 ϵ 的增大而减

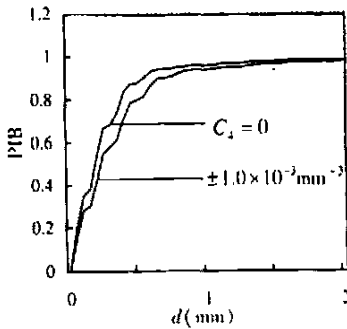


Fig. 4 PIB at the geometrical focal plane as a function of beam order n , the calculation parameters are $\epsilon = 0.3$, $a = 1.5\text{mm}$, $C_4 = 0$

小。在 ϵ 相同的条件下,几何焦面上有球差透镜的 η 小于无球差透镜的 η 值;实际焦面上负球差透镜的 η 最大,无球差透镜次之,正球差透镜最小。说明选取适当的有方环光阑负球差透镜可得到比无球差透镜中心主瓣内含能量百分比更高的光束。

Table 1 β_1 and β_2 parameters

ϵ	0	0.1	0.3	0.5
β_1, β_2				
β_1 (at the geometrical focal plane, $C_4 = \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)	1.094	1.191	4.785	11.604
β_1 (at the actual focal plane, $C_4 = 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)	1.007	1.082	3.036	7.334
β_1 (at the actual focal plane, $C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)	0.992	1.058	3.005	6.976
β_2 (at the geometrical focal plane, $C_4 = \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)		1.111	1.586	1.606
β_2 (at the actual focal plane, $C_4 = 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)		1.010	1.006	1.011
β_2 (at the actual focal plane, $C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}^{-3}$)		0.992	0.988	0.958

Table 2 η_1 parameters

ϵ	0	0.1	0.3	0.5
$\eta_1 / \%$				
$C_4 = 0$ (at the geometrical focal plane)	89.44	80.21	35.31	4.25
$C_4 = \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}$ (at the geometrical focal plane)	88.04	78.90	29.03	4.07
$C_4 = 0$ (at the actual focal plane)	89.44	80.21	35.31	4.25
$C_4 = -1.0 \times 10^{-3} \text{mm}$ (at the actual focal plane)	90.35	80.90	35.35	4.39
$C_4 = 1.0 \times 10^{-3} \text{mm}$ (at the actual focal plane)	89.26	79.68	34.66	4.13

3 小结

我们采用 PIB, β 参数和 η 参数作为激光光束质量评价参数,研究了方环光阑球差透镜对超高斯光束质量的影响。研究表明,超高斯光束经方环光阑球差透镜后,其光束质量与透镜的遮拦比 ϵ 、球差系数 C_4 和超高斯光束阶数 n 等因素有关。光束在实际焦面和几何焦面上的桶中功率均随透镜的遮拦比 ϵ 的增大而减小。 ϵ 一定的条件下,在几何焦面上,球差系数绝对值相同的正负球差透镜的 PIB 曲线重合,无球差透镜的 PIB 大于有球差透镜的 PIB;而在实际焦面上,负球差透镜的 PIB 最大,无球差

(下转第 113 页)

特性。图 3a 为封装前,图 3b 为封装后。图 3a 中,1310nm 信道插入损耗约为 0.2dB,1550nm 信道 20dB 损耗阻带带宽为 15nm,采用更高强度的光源,1310nm 信道对 1550nm 信道隔离度可望超过 25dB。对比 a, b 两图可知,封装前后长周期光纤光栅谱特性基本不变。

显然,700 μm 周期的长周期光纤光栅是较为理想的 1310nm 信道解复用器件。由于实验条件的限制,制备的 1550nm 信道解复用器件效果不甚理想,插入损耗略显过大。

图 2 和图 3 中,阻带为平顶,原因在于白光光源强度有限。图 2 中,封装前后谱特性有所变化,经分析,原因在于封装过程与制备过程光纤状态不同,封装时,光纤轴向拉力有所增加,使得光栅谱特性表现为阻带向短波方向略有移动,而且在 1410nm 处有出现谐振峰的趋势。因此,为保证解复用器能够符合要求,应尽量使光纤在制备过程与封装过程状态保持一致。

在光栅制备之前,光纤固定于 3 轴移动平台时略加了轴向应力,这是为了光纤能够平直。如果光纤较松弛,电弧放电就会引起光纤颤动,影响刻槽效果。实验还发现,电弧放电会使光纤有所松弛,位置向下移动,因此,固定光纤位置略高于两电极。

在制备了 1310nm 阻带的长周期光纤光栅后,测试了外部折射率对其谱特性的影响。将制备的长周期光纤光栅浸入有甘油配制而成的折射率匹配液中,匹配液折射率指数从 1.33 到 1.467 变化。结果发现,匹配液折射率指数变化时,光栅谱特性有较为明显的变化,阻带中心波长有所漂移。并且对制备的长周期光纤光栅加以不同的轴向应力,发现谱特性也有明显的变化。轴向应力过大,谱中明显出现其它谐振峰。

因此,长周期光纤光栅制备之后需要封装,以稳

定其谱特性。封装之后,多次测试长周期光纤光栅(温度保持恒定),其谱特性基本保持不变。我们研究的是宽阻带的长周期光纤光栅,温度影响比窄带小得多,故没有涉及温度对长周期光纤光栅谱特性的影响。若为窄带时,必须考虑温度对长周期光纤光栅的影响,对光栅进行温度补偿。

4 总 结

利用高压电源通过一对电极产生的电弧放电,在单模常规光纤上实现了热融刻槽,制备了长周期光纤光栅。通过控制电弧放电过程和光栅的周期及长度,使制备的长周期光纤光栅谱特性表现了良好的波分解复用能力。结果表明,通道插入损耗可达 0.2dB,信道隔离度达到 25dB,能够实现 1310nm/1550nm 波分复用系统信道的解复用。如果实验方法进一步完善,实验条件得到改善,通带信道插入损耗小于 0.5dB(540 μm 周期的光栅)是能够实现的。而在特殊设计的光纤上制备两个级联的长期光纤光栅,并且特殊设计光栅及光栅之间的距离,则能够形成多波长带通结构的光栅谱特性,使多个波长的解复用成为可能。

参 考 文 献

- [1] Bilodeau F, Johnson D C, Theriault S *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7: 388- 390.
- [2] Takahashi H, Nishi I, Hibino Y. Electron Lett, 1992, 28: 380-382.
- [3] 何万迅,施文康,叶爱伦. 光学精密工程, 2001, 9(2): 104~ 108.
- [4] 何万迅,施文康,叶爱伦. 光学技术, 2001, 27(5): 396~ 400.
- [5] Kosinski S G, Vengsarkar A M. Splicer-based long-period fiber gratings, in OFC'98 Tech Dig, 1998: 278~ 279.
- [6] Narayanan C, Presby H M, Vengsarkar A M. Electron Lett, 1997, 33(4): 280~ 281.
- [7] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N *et al.* Electron Lett, 1999, 35: 740~ 742.

(上接第 110 页)

透镜次之,正球差透镜最小。选用适当的负球差透镜,在实际焦面上可得到较大的 PIB, η 值和较小的 β 值,甚至可实现 β_1, β_2 小于 1。最后,值得指出的是,虽然我们仅以球差为例对矩形域中畸变环状超高斯光束的光束质量做了分析,但所用方法可进一步推广用于有任意位相畸变和振幅分布高功率激光的情况,因而具有普遍性意义。

参 考 文 献

- [1] Martinez-Herrero R, Piguoro G, Mejias P M. Opt & Quant Electron, 1995, 27: 173~ 183.
- [2] 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992.
- [3] Siegman A E. OSA TOPS, 1998, 17: 184~ 199.
- [4] Li Y, Wolf E. Opt Commun, 1982, 42(3): 151~ 156.
- [5] Garay A. SPIE, 1988, 888: 17~ 22.