

非稳腔的远场光强分布和光束质量*

罗时荣 吕百达 黄 鹭

(四川大学激光物理与化学研究所,成都,610064)

摘要: 在对远场光强分布分析的基础上,对非稳腔的光束质量作了详细研究。证明了当遮拦比 ≥ 1 时,其远场光强是零阶贝塞尔光束分布。对数值计算结果的物理分析表明:用“桶中功率”曲线是评价非稳腔远场光束质量适用的方法。同时,也指出了这种方法的不足之处。

关键词: 非稳腔 光束质量 桶中功率 光束参数乘积

The far-field intensity distribution and beam quality of unstable resonators

Luo Shirong, Lü Baida, Huang Lu

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

Abstract: Based on the analysis of the far-field intensity distribution, the beam quality of unstable resonators has been studied in detail. It has been proven that the intensity in the far-field of unstable resonators is the zeroth order Bessel beam distribution, if the obscure ratio ≥ 1 . Numerical calculation and analysis have shown that the “power in the bucket” curve is a suitable method used to characterize the beam quality in the far-field of unstable resonators. Meanwhile, the shortcomings of this method have been pointed out.

Key words: unstable resonator beam quality power in the bucket (PIB) beam parameter product

引 言

对非稳腔输出激光光束质量的评价,一直是困扰激光工作者的一个问题。主要原因可归结为:第一,理论上用二阶矩定义的 M^2 因子对非稳腔计算时遇到积分发散的困难^[1]。第二,均匀反射率镜非稳腔的本征基模为球面波(平面波为其特例),采用腔内插入耦合板或从一端反射镜(中心遮拦)输出时,近场为环状球面波或环状平面波。即使在理想情况下,从非稳腔输出激光也不可能是基模高斯光束。这意味着在测量方法正确前提下,对实际非稳腔输出光束测得的 M^2 值(二阶矩定义)总是大于 1 的。换言之,在 M^2 因子的理论中,取基模高斯光束为基准,对非稳腔来说有失“公平”。最近, Siegman 教授明确指出^[2], “It is strongly recommended that the M^2 value for a real beam be referred to, not as the “beam quality” for that beam, but as the beam propagation factor, ...”请注意,与文献[3]相比较,这是 Siegman 教授对 M^2 因子概念的重要修正。这样,就有可能从实际应用出发,对一直被排除在 ISO(国际标准化组织)工作之外的非稳腔光束质量进行研究。

* 国家高技术激光技术主题项目资助。

1 非稳腔输出光束的远场分布

用夫朗和费衍射积分公式,可推出非稳腔输出的光束的远场光强分布公式为^[4]

$$I(\theta) = \frac{1}{(1 - \epsilon^2)^2} \left[\frac{2J_1(ka)}{ka} - \epsilon^2 \frac{2J_1(ka)}{ka} \right]^2 I(0) \tag{1}$$

式中, a 为圆环外径, ϵ 是遮拦比, k 为波数, J_1 是一阶贝塞尔函数, θ 是远场发散角, $I(0)$ 为轴上的光强,且 $I(0) = c^2 S^2$, c 为圆环内的场实振幅大小, S 为圆环的面积。

当 $\epsilon = 0$ 时, (1) 式成为圆孔衍射的光强分布 $I(\theta) = [2J_1(ka)/(ka)]^2 I(0)$ (2)

而当 $\epsilon = 1$, 即细圆缝衍射时, 利用 n 阶贝塞尔函数 J_n 的积分表达式

$$J_n(x) = \frac{i^{-n}}{2} \int_0^{\pi} \exp(ix \cos \alpha) \exp(in\alpha) d\alpha \tag{3}$$

将非稳腔激光器输出光束的远场振幅 $U(\theta)$ 分布的夫朗和费衍射积分公式简化为:

$$U(\theta) = 2c \int_0^a J_0(kr) dr \tag{4}$$

式中 J_0 为零阶贝塞尔函数, 因为被积函数 $J_0(kr)$ 在闭区间 $[0, a]$ 上连续, 利用积分中值定理得到:

$$U(\theta) = 2cr J_0(kr) \tag{5}$$

其中, r 为闭区间 $[0, a]$ 上的某值。当 $\theta = 0$ 时有

$$U(0) = 2c \int_0^a J_0(kr) dr = 2cS J_0^2(ka) \tag{6}$$

于是得到 $\theta = 0$ 时的远场光强分布:

$$I(0) = |U(0)|^2 = 4c^2 S^2 J_0^2(ka) \tag{7}$$

这正是零阶贝塞尔光束的光强分布。所以, 可利用两反射镜半径接近的非稳腔产生贝塞尔光束。图 1 画出了光束遮拦比 ϵ 等于 0, 0.5 和 0.99 的非稳腔光束远场光强分布。

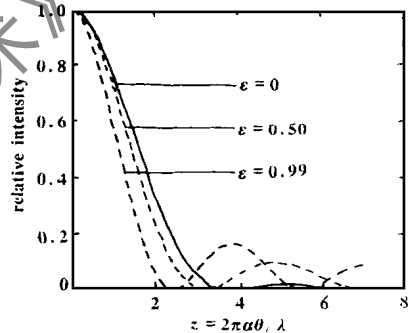


Fig. 1 The far-field intensity distribution of the beam from a unstable resonator with different obscure ratio

2 非稳腔的光束质量评价

2.1 用桶中功率(PIB)曲线来评价非稳腔的远场光束质量

如果只关心非稳腔远场光束分布的能量集中度, 可用 PIB 曲线来评价非稳腔的光束质量^[2,5]。有两种方法: (1) 用某一确定发散角内的功率含量占总功率的百分比来评价非稳腔的远场光束质量。由

$$p = \int_0^\theta I(\theta) d\theta / \int_0^\infty I(\theta) d\theta = \frac{2^2 a^2}{2(1 - \epsilon^2)} \int_0^\theta \left[\frac{2J_1(ka)}{ka} - \epsilon^2 \frac{2J_1(ka)}{ka} \right]^2 d\theta \tag{8}$$

可求出: 在不同遮拦比 ϵ 的非稳腔远场光强分布中, 不同远场发散角内的功率含量占总功率的百分比 p 。计算结果见图 2。由图知: 相同的发散角内, ϵ 大的 p 对应的非稳腔远场光强分布的功率含量就小些。因此, 随着 ϵ 的逐渐增加, 非稳腔的光束质量越来越差。

(2) 用某一确定的功率含量百分比对应的远场发散角来评价非稳腔的光束质量。用该方法来评价非稳腔的光束质量时, 越大的远场发散角对应的非稳腔的光束质量就越差。例如, 可根据实际工作需要取 50%, 84% 或 90% 的功率含量百分比来比较不同遮拦比 ϵ 的非稳腔的光

束质量。由图 2 知,对一确定的功率含量百分比,大的光束遮拦比 对应的非稳腔远场光强分布的发散也大。所以,我们也得到相同的结论:随着的逐渐增加,非稳腔的光束质量也越来越差。

前已证明,当遮拦比趋于 1 时,非稳腔远场光强分布为 J_0^2 分布,因贝塞尔的光束大部分功率分布在旁瓣上,不宜用桶中的功率曲线来评价它的光束质量,对于贝塞尔的光束质量评价可参考文献[6]。

2.2 用光束参数积评价非稳腔的光束质量

文献中还提出了另一种评价非稳腔的光束质量的方法:用光强降至轴上光强的 50% 和 86.5% 来表征非稳腔环状光束的远场发散全角,并用它与近场的光斑的最小直径的乘积来表征非稳腔的光束质量。我们只考虑两种极限情况: $\epsilon = 0$ 和 $\epsilon = 1$ 。

(1) $\epsilon = 0$ 光强降至轴上光强的 50% 对应的远场发散全角为: $2\theta = 0.51/a$, 在该发散角内包含了总功率含量的 47.25%。光束参数积为 $2\theta \times 2a = 1.02$ 。

光强降至轴上光强的 86.5% 对应的远场发散全角为: $2\theta = 0.82/a$, 在该发散角内包含了总功率含量的 76.63%。光束参数积为 $2\theta \times 2a = 1.64$ 。而第一旁瓣的极大值与轴上光强最大值的比值为: 1.75%。

(2) $\epsilon = 0.999$ 光强降至轴上光强的 50% 对应的远场发散全角为: $2\theta = 0.36/a$, 在该发散角内包含了总功率含量的 0.046%。光束参数积为 $2\theta \times 2a = 0.72$ 。

光强降至轴上光强的 86.5% 对应的远场发散全角为: $2\theta = 0.56/a$, 在该发散角内包含了总功率含量的 0.072%。光束参数积为 $2\theta \times 2a = 1.12$ 。而第一旁瓣的极大值与轴上光强最大值的比值为: 16.22%。

从上面的讨论可知,如果用光强降至轴上光强的 50% 和 86.5% 来评价非稳腔的光束质量,这两种极限情况的光束参数积都为量级,但这种光束质量评价方法有一个原则性的缺陷,即远场和近场的光束参量不是按一种方式定义的,近场用环状光斑的内径定义束宽,而在远场用轴上最大光强的 50% 和 86.5% 定义角宽度。此外, $\epsilon = 1$ 时,光强降至轴上最大光强的 50%, 86.5% 确定的远场发散角范围内的光能量仅占总能量的极少一部分。所以,用这种方法来评价非稳腔的光束质量是不严格的。

3 讨 论

我们的计算和分析表明,用 PIB 曲线作为非稳腔远场光束质量评价的一种方法是可行的,而且,一般对功率的测量比束宽的测量精确度要高,也避免了因实际测量误差太大带来的一系列问题。但是,仅用 PIB 曲线评价非稳腔输出激光光束质量无论从理论上或实验上,都是不够的。这是因为:(1)在理论上,光束质量问题是与光束传输密切相关的。严格而言,对实际光束,我们所熟知 ABCD 定律(对三维非高斯光束应扩展为 4×4 光束参数矩阵变换定律^[7])是建立在束宽的二阶矩定义之上的。那么,理论上对非稳腔输出光束的束宽有无定义? 如何定义? 似乎并无统一认识。(2)在 Siegman 的理论中, M^2 因子实际上包括了光束的近场参数(束腰宽度)和远场参数(远场发散角)的影响。仅用远场 PIB 曲线评价空间域中的光束

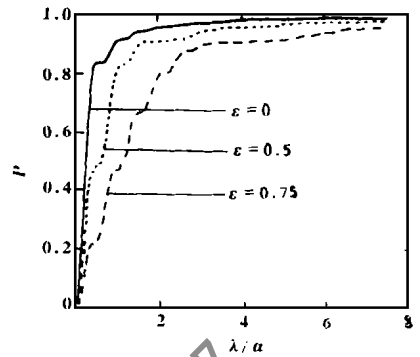


Fig. 2 The power in the bucket as a function of λ/a

光学元件吸收测量

魏红振 李家蓉

(华中理工大学激光技术国家重点实验室,武汉,430074)

摘要: 采用量热法测量了光学元件的吸收,分析了元件表面反射对测量的影响,并测量了 GaAs 基片和 GaAs 高反镜的吸收,分析了测量误差。

关键词: 量热法 光学薄膜 吸收测量

Measurement of optical component absorption

Wei Hongzhen, Li Jiarong

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: For design of a high-energy laser system, it is important to measure the absorption properties of optical components. This paper presented calorimetry to measure the optical absorption and discussed the influence of the environmental factors and the interface reflection. As an example, the absorption of GaAs substrate and GaAs high reflective mirror were measured. Finally, the measurement error was analyzed.

Key words: calorimeter optical thin film absorption measurement

质量是不够的,原因是相同的远场 PIB 可以由不同的近场分布光束得到,而不同近场分布的光束在光学系统中(放大系统、光阑、空间滤波器、大气等等)的传输行为可能大相径庭。(3)在实际工作中,例如,对激光加工、惯性约束聚变驱动器光束质量评价,常会提出对光强分布均匀性和光束稳定性(光束瞄准精度、光斑稳定性)等要求,这些指标均应作为评价光束质量参数。

综上所述,用 PIB 曲线评价非稳腔远场光束质量是一个有效而适用的方法。但是,对非稳腔输出激光空间域光束质量的全面评价,应当根据实际应用目的,增选其它光束参数(包括近场光束参数),与 PIB 曲线一起评价光束质量。并且,对非稳腔与光束质量和光束传输有关的一些理论问题尚值得继续深入研究。

参 考 文 献

- 1 杨成龙. 激光杂志,1997;18(4):4~10
- 2 Siegman A E. OSA TOPS,1988;17:184~199
- 3 Siegman A E. SPIE,1990;1224:2~14
- 4 Born M, Wolf E. Principles of Optics, fifth edition, Oxford: Pergmon Press, 1975
- 5 杜祥琬. 中国激光,1997;24(4):327~332
- 6 Borghi R, Santarsiero M. Opt Lett, 1997;22:262~264
- 7 Nemes G, Serna J. O S A TOPS, 1998;17:200~207

作者简介:罗时荣,女,1966年5月出生。现于四川大学光电技术系攻读硕士学位。