

# 稳腔固体激光器光束参量的研究

王 英 曹红兵 陈泽民 王海林

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 定义了适用于多模固体激光器的光束质量参量, 理论和实验结果表明, 定义的光束参量的变换遵循  $ABCD$  法则, 通过成像系统后保持不变。

关键词: 稳定谐振腔 固体激光器 光束参量

## Beam parameters of stable cavity solid laser

Wang Ying, Cao Hongbing, Chen Zemin, Wang Hanlin

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** In laser applications, it is a very important problem to define the beam quality of the laser beam, especially for the multi model laser beam. In general,  $M^2$  factor is a useful parameter relative to divergence angle and waist diameter of laser beam. If we determined  $M^2$ , the beam quality parameters of the practical beam, defined with second order moments, would determine. In practice, the precise measurements of these second order moments are difficult. This paper emphasized that beam parameters defined with energy distribution of beam profile are satisfied with  $ABCD$  law for stable cavity solid laser, because the output beam is the sum of multi orders of Gaussian lights. The experiments and analysis are well agreeable.

**Key words:** stable resonator solid state laser beam quality parameter

## 引 言

随着激光应用领域的不断拓展, 激光的许多应用已经从最初的创新性工艺研究转变为标准的应用技术, 由此相应带来激光参数的标准化问题。在所有的激光参数中, 激光束的光束质量处于相当特殊的地位。一方面, 几乎所有的实际应用都涉及光束参量, 另一方面, 对光束质量的定义又始终未统一标准。我们试图对稳定谐振腔固体激光器的光束参量研究从实际的角度提出一些看法。

### 1 光束参量的定义和特性

由于激光束形式的多样性, 光束参量的统一定义问题始终是一个复杂的问题。采用二阶矩的方法较好地解决了这一问题。

根据国际标准化组织(ISO)的定义, 任意激光束的近场光斑直径  $D$  和远场发散角  $\theta$  可以

采用二阶矩方法定义<sup>[1]</sup>: 
$$D_x^2(z) = 4 \int (x - \bar{x})^2 I(x, y) dx dy \sqrt{\int I(x, y) dx dy} \quad (1)$$

$$\theta_x^2 = 4^2 \int (\theta_x - \bar{\theta}_x)^2 I(\theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y \sqrt{\int I(\theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y} \quad (2)$$

式中,  $\bar{x}$ ,  $\bar{\theta}_x$  分别代表光束中心和光束传播方向,  $I(x, y)$  为近场光强分布,  $I(\theta_x, \theta_y)$  则为远场

光强角分布。

$$\bar{x} = \int_A x I(x, y) dx dy \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_x = \int \theta_x I(\theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y \quad (4)$$

如果我们选取  $z$  轴沿光束中心, 则  $\bar{x} = \bar{\theta}_x = 0$ 。这种简化不会给我们的结论带来任何影响, 但在推导时可以带来许多便利。此时, 光斑直径  $D$  和发散角  $\theta$  之间满足下面关系式<sup>[1]</sup>:

$$D^2(z) = D_0^2 + \theta^2(z - z_0)^2 \quad (5)$$

式中,  $z_0$  为腰斑直径的位置,  $D_0$  则为腰斑尺寸。

上述定义的光斑直径  $D$  和发散角  $\theta$  有其深刻的物理含义, 在其基础上可以定义出任意光束的传输因子  $M^2$ :

$$M^2 = D_0 \cdot \theta / (D_{0, \text{TEM}_{00}} \cdot \theta_{\text{TEM}_{00}}) \quad (6)$$

激光束的光束质量评价问题是难题之一,  $M^2$  参数的提出为最终较好地解决这一问题开辟了一条新的思路。根据(5)式, 文献[2]通过严格的推导得出结论: 在二阶矩定义下的光束参量通过光学系统的变换满足  $ABCD$  法则。在此基础上, 我们发现谐振腔中的实际振荡光束的二阶矩光斑直径就是基模高斯光束光斑直径  $2\omega_{\text{TEM}_{00}}$  的  $M$  倍,  $D = 2M\omega_{\text{TEM}_{00}}$ , 同时, 实际振荡光束的二阶矩远场发散角就是基模高斯光束远场发散角  $2\theta_{\text{TEM}_{00}}$  的  $M$  倍,  $\theta = 2M\theta_{\text{TEM}_{00}}$ 。由此可见, 只要能够确定  $M^2$  参数, 则二阶矩定义下实际光束的光束参量就完全确定了。

但是仔细分析后, 我们发现二阶矩的定义也有许多很难克服的缺点:

首先, 对圆环或圆形平顶光束, 二阶矩定义的远场发散角为无穷大, (2)式积分不收敛。其次, 在  $D$  或  $\theta$  中所包含的功率百分比随光束形式不同而有很大差别。这对于光学系统的光阑设计不利。例如, 一个直径为  $d$  的圆形光束的二阶矩的光斑直径仅为  $d/\sqrt{2}$ 。最后, 二阶矩定义光束质量的准确测量困难, 因为光束尺寸的二阶矩积分中有  $x^2$  存在, 对于光束外缘, 光强很小但  $x^2$  很大, 因此, 光强很弱的光束外缘在积分中所占的比例却并不小, 由于探测器不可避免地存在噪声, 这就使得每次测量的结果可能差别很大。总的来说, 二阶矩定义的光束质量理论优势明显, 但是, 实用上较困难。相反地, 采用传统的围桶能量法定义的光束参量  $\omega_{86.5\%}$

和  $\theta_{86.5\%}$ :

$$\int_{\omega_{86.5\%}}^{\omega_{86.5\%}} \int_{\omega_{86.5\%}}^{\omega_{86.5\%}} I(x, y) dx dy \bigg/ \iint_{\infty}^{\infty} I(x, y) dx dy = 86.5\% \quad (7)$$

却可以很好地克服二阶矩方法的缺点, 因此, 国际标准化局的文件中将两种定义方法都作为标准定义。

但是仔细的研究发现, 一般情况下, 围桶能量法定义下的光束参量不严格满足  $ABCD$  法则, 因此, 相对二阶矩定义方法而言, 其理论分析更困难一点, 换句话说, 围桶能量定义的光束参量虽然实用, 但理论分析困难。我们的主要目的是通过以下的分析得出结论: 对于稳腔固体激光器而言, 围桶能量定义的光束参量变换满足  $ABCD$  法则。

## 2 稳腔固体激光器实用化光束质量分析

稳定谐振腔中的再现模式为高斯-厄米或高斯-拉盖尔光束, 实际输出光束为厄米-高斯或拉盖尔-高斯光束的叠加, 这两种光束的特点是它们的各阶光场的光斑大小均满足相同的规律<sup>[3]</sup>:

$$\omega_{n, 86\%}^2 = \omega_{n, 0.86\%}^2 \{ 1 + [M(\pi\omega_{0.86\%})^2]^2 (z - z_0)^2 \} \quad (8)$$

式中,  $\omega_{n, 86\%}$ ,  $\omega_{n, 0.86\%}$  分别是第  $n$  阶光束的光斑和腰斑, 由此可见, 所有各阶光束随  $z$  的变化均满足相同的变化规律。虽然各阶光束的腰斑不同, 但它们的发散规律相同, 即均以相同的速

率变化。因此,所有这些光束的叠加随  $z$  的变化也必须满足这一变化规律。则有:

$$\omega_{86.5\%}^2 = \omega_{086.5\%}^2 \{ 1 + [N(\pi\omega_{086.5\%})]^2(z - z_0)^2 \} \tag{9}$$

由此可见,对于稳定谐振腔,其实际输出光束随  $z$  的变化的(9)式与二阶矩定义下的(5)式形式相同,而根据文献[4],只要光束参量满足(5)式,则可以证明这种光束质量满足  $ABCD$

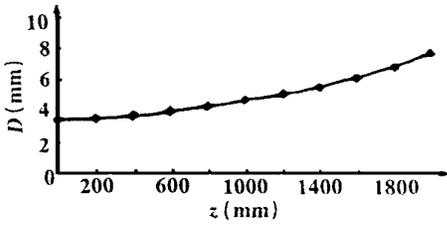


Fig. 1 Beam size defined under barreling power vs. distance

法则。为了验证稳定谐振腔输出光束是否满足(9)式,是否由于固体激光材料的引入产生畸变,我们采用光束分析仪及可变光阑等方法进行了大量的测量,结果均表明在实际误差范围内,稳腔固体激光器输出光束的围桶测量光参量满足(9)式,表1是一组典型实验数据。实验数据与标准二项式函数的比较如图1所示,由图1可见实际输出光束与标准

二项式吻合得很好。在所有的测量中,结果基本相同。

Table 1 The experiment date of YAG laser

$z$ (mm)	$D(z)$ (mm)	$D^2(z)$ (mm <sup>2</sup> )
0	3.475	12.076
200	3.54	12.532
400	3.665	13.432
600	4.00	16.000
800	4.26	18.148
1000	4.615	21.298
1200	5.015	25.150
1400	5.46	29.812
1600	6.04	36.482
1800	6.78	45.968
2000	7.67	58.829

### 3 稳腔中的谐振腔光束参量

根据上一节的理论分析和实验结果,可以得出结论:稳腔固体激光器的输出光束的围桶能量光束参量满足  $ABCD$  法则。

设稳腔中谐振光束的围桶能量光束直径为  $D$ ,远场发散角为  $\theta$ :  $D_0 \cdot \theta = 4\lambda M^2 / \pi$  (10)

定义实际光束的  $q(z)$  为:

$$R(z) = z + (1/z) \{ (\pi/\lambda) [D^2 / (4M^2)] \} \tag{11}$$

$$1/q(z) = [1/R(z)] - \{ i4M^2 / [\pi D^2(z)] \} \tag{12}$$

则当光束通过光学矩阵为  $ABCD$  的光学系统变换时,设入射光束的  $q$  参数为  $q_1$ ,则出射光束  $q$  参数为  $q_2 = (Aq_1 + B) / (Cq_1 + D)$  (13)

根据  $ABCD$  法则,与基模高斯光束一样,可以推出稳定谐振腔中的实际光束参量。

经过仔细的推导,发现实际的稳定光学谐振腔中谐振光束的光斑和发散角分别是基模高斯光束的  $M$  倍。假设谐振腔中限模光阑处的基模高斯光束光斑半径为  $\omega_l$ ,光阑半径为  $R_0$ ,则谐振腔中的实际谐振激光束的  $M$  参量可以估计为  $M \cong R_0 / \omega_l$ 。同样,输出光束的  $M^2$  参量可以估计为:  $M^2 \cong (R_0 / \omega_l)^2$  (14)

为了验证上式,我们在高功率  $CO_2$  激光器上作了如下实验:在同一谐振腔中改变  $R_0$ ,测量输出光束的  $M^2$  值,结果如图2,可见实验结果与理论吻合得很好。

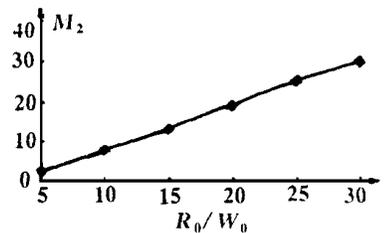


Fig. 2 The  $M^2$  factor of laser beam vs. aperture

### 4 结 论

讨论了稳定谐振腔中的实际光束的围桶能量光腰和发散角经过光学系统的变换,由此得

## 国际卫星光通信技术发展

谭立英 马 晶 林维秋

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨, 150001)

黄 波

(总装备部, 北京, 100034)

**摘要:** 回顾了各国卫星光通信发展的历史, 并分析了卫星光通信技术的发展趋势。对于今后商业上对卫星光通信的需求作了介绍和分析。

**关键词:** 卫星光通信 历史回顾 技术发展

## Technology development of inter-satellites optical communications

*Tan Liying, Ma Jing, Lin Weiqiu*

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

*Huang Bo*

(General Armament Department, Beijing, 100034)

**Abstract:** In this paper, the history of development of intersatellite optical communications in the countries is retrospect, and it analyzes the developing trend of the technology of intersatellite optical communications. The commercially demand for intersatellite optical communications in the future is introduced and analyzed.

**Key words:** intersatellite optical communications history in retrospect development of technology

## 引 言

卫星光通信是一个较新的研究领域, 并越来越得到各国政府的重视。美国、欧洲、日本等

出结论: 采用围桶能量定义光束参量时, 对于稳定谐振腔中实际光束同样可以定义  $q$  参数,  $q$  参数满足  $ABCD$  法则。作为这一结论的一个应用, 证明了谐振腔中实际谐振光束的光斑和发散角分别是基模高斯光束的  $M$  倍。由于围桶能量下的光束参量的测量方便实用, 因此, 这一结论对于正确认识稳腔中的谐振光束的特性有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 Siegman A E. SPIE, Optical Resonators, 1990; 1224: 2~ 14
- 2 陈培锋, 丘军林. 激光技术, 1996; 20(1): 46~ 49
- 3 周炳琨, 高以智, 陈家华 *et al.* 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1991
- 4 陈培锋, 丘军林. 激光与光电子学进展, 1996; (7): 97

\* \* \*

作者简介: 王 英, 女, 1962 年出生。讲师。现从事固体激光器件和固体激光应用的研究。