

DB43

湖 南 省 地 方 标 准

DB43/T 1776—2020

高能连续光纤激光器主要参数测试方法

Test methods for major parameters of coutinous-wave high energy fiber lasers

2020-05-15发布

2020-08-15实施

湖南省市场监督管理局 发布

目 次

前言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义 1

4 测试条件与要求..... 2

 4.1 测试条件..... 2

 4.2 测试设备要求..... 2

 4.3 安全防护..... 2

 4.4 激光器操作要求 2

5 测试方法 3

 5.1 输出功率..... 3

 5.2 输出功率不稳定性 3

 5.3 稳定出光时间 5

 5.4 峰值波长..... 5

 5.5 谱宽度 6

 5.6 光束质量..... 6

 5.7 激光器装置效率 10

6 测试报告 10

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由湖南省计量检测研究院提出。

本标准由湖南省军民融合标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：湖南省计量检测研究院、国防科技大学前沿交叉学科学院、湖南兵器光电科技有限公司、湖南大科激光有限公司。

本标准主要起草人：张遥奇、韩凯、吴双双、柏文琦、奚小明、张蓉、江厚满、李银轩、李文煜、宋扬、张彬。

高能连续光纤激光器主要参数测试方法

1 范围

本文件规定了高能连续光纤激光器（以下简称激光器）主要参数测试的术语及定义、测试条件和要求、测试方法等。

本标准适用于单纤输出功率 100W 及以上、稳定出光的高能连续光纤激光器主要参数的测试。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 7247.1 激光产品的安全 第 1 部分：设备分类、要求和用户指南

GB/T 13863 激光辐射功率和功率不稳定性测试方法

GB/T 15313 激光术语

GB/T 32831 高能激光光束质量评价与测试方法

ISO/TR 11146-3-2004 激光和激光相关设备. 激光束宽度、发散角度和束扩散率. 第 3 部分：内在和几何激光束分类、扩散和试验方法细节

3 术语和定义

GB/T 15313 界定的术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了 GB/T 15313 中的某些术语和定义。

3.1

输出功率 output power

取一定稳定出光时间内平均输出功率作为连续激光器的输出功率。

3.2

输出功率不稳定性 output power instability

在一定时间范围内，2 倍激光输出功率变化的标准差与激光输出功率的平均值的比。

[GB/T 15313-2008, 定义 2.1.83]

3.3

稳定出光时间 CW-output instability time

激光器输出功率保持在额定功率 90% 以上的持续时间。

3.4

峰值波长 peak wavelength

光谱辐射功率最大处所对应的波长。

3.5

谱宽度 spectral bandwidth

也称为 3dB 谱线宽度，光谱辐射功率为其最大值的一半处所对应波长（或频率）的最大间隔。Δλ

表示波长谱宽度， $\Delta\nu$ 表示光频率谱宽度。

3.6

光束质量 beam quality

描述激光器输出光束空间传输特性和聚焦性能的物理量，表征了被测激光束接近理想光束的程度，本标准采用 M^2 因子和 β 因子表示。

注 1：光束质量 M^2 因子参见 [GB/T 15313—2008，定义 2.1.71]

注 2：光束质量 β 因子参见 [GB/T 32831—2016，定义 3.6]

3.7

激光器装置效率 laser device efficiency

激光束内的所有功率（或能量）与包括全部附属系统在内的所有输入功率（或能量）的商。

[GB/T 15313—2008，定义 2.1.104]

4 测试条件与要求

4.1 测试条件

在被测激光器无其他条件要求情况下，测试环境应满足以下要求：

- a) 环境温度：25℃±5℃；
- b) 相对湿度：55%±20%；
- c) 洁净度：万级；
- d) 大气压力：86kPa~106kPa；
- e) 其他环境条件：整个测量系统应处于无明显震动、气流和杂散辐射影响的环境中，不得有影响测量结果的干扰。干扰无法避免时，需采取隔振和光电噪声屏蔽等措施，保证振动与杂散光等外界因素对测试的影响在允许的范围内；
- f) 供电电源电压应满足测试对象和测试装置的使用要求。

4.2 测试设备要求

- 4.2.1 测量所用的测试装置、光学系统、光学元件应经计量机构检定或校准，并且在有效期内；
- 4.2.2 测试装置、光学系统、光学元件的工作波段应涵盖被测激光波长；
- 4.2.3 测试装置、光学系统、光学元件引入的像差峰谷值（PV）应小于被测激光波长的四分之一，像差均方根值（rms）应小于被测激光波长的十分之一；
- 4.2.4 测试装置、光学系统、光学元件的抗激光损伤阈值应高于被测激光功率密度的 2 倍；
- 4.2.5 测试装置的有效通光口径应大于被测光束直径的 1.2 倍；测试装置的线性动态范围应大于 30dB；测试装置的响应时间、量程、分辨率等指标应满足测试方法的要求；
- 4.2.6 光束衰减器的衰减倍率应满足测试装置动态范围的要求和测试方法的要求。光束衰减器由于波长、偏振、非线性、非均匀性等因素引起的光束质量相对变化应在使用前进行标定，且小于 5%；
- 4.2.7 为了保护仪表免受不允许的突然过载，允许在测试设备上采用保护装置，但不能影响测量精度；
- 4.2.8 电功率测量应选用具备分析功能的仪器，有功功率测量准确度优于 0.5%。

4.3 安全防护

安全防护应符合 GB 7247.1 中的有关规定。

4.4 激光器操作要求

被测光纤激光器应在规定的工作程序和工作条件下运行，并在稳定运行后测量各有关参数。

5 测试方法

当存在多个测试方法时，可根据被测激光器给出的参数指标，采用对应的方法进行测试。

5.1 输出功率

5.1.1 测试图

测试图见图 1 输出功率测试图。



- 说明：
- 1——被测激光器；
 - 2——光闸（必要时）；
 - 3——衰减器（必要时）；
 - 4——窄带滤光片（必要时）；
 - 5——激光功率计。

图 1 输出功率测试图

5.1.2 测试步骤

- 5.1.2.1 按 5.1.1 的要求搭建测试装置，并按照测试设备要求进行通电预热；
- 5.1.2.2 根据激光器的额定功率选择激光功率计合适的量程，并校准其零点；
- 5.1.2.3 根据激光器的光束尺寸，调节激光光束，使其正入射至功率计探头的中央部位；
- 5.1.2.4 根据激光器实际使用的连续工作时间确定激光功率的测量间隔，在稳定出光时间内，重复测量 n ($n \geq 10$) 次，取其平均值作为激光器的输出功率值，见公式 (1)；

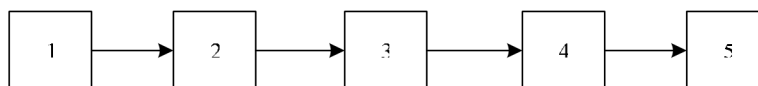
$$P = \frac{1}{\tau_s} \cdot \frac{1}{\tau_z} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：
- P ——输出功率，单位为 W；
 - τ_s ——衰减器透射比；
 - τ_z ——窄带滤光片透射比；
 - n ——测量次数；
 - P_i ——第 i 次测得的功率，单位为 W。

5.2 输出功率不稳定性

5.2.1 测试图

测试图见图 2 输出功率不稳定性测试图。



说明:

- 1——被测激光器;
 2——光闸 (必要时);
 3——衰减器 (必要时);
 4——窄带滤光片 (必要时);
 5——探测系统。

图 2 输出功率不稳定性测试图

5.2.2 测试步骤

- 5.2.2.1 按 5.2.1 搭建测试装置, 并按照测试设备要求进行通电预热;
- 5.2.2.2 根据激光器的额定功率选用探测系统合适量程, 并校准其零点;
- 5.2.2.3 根据激光器的光束尺寸, 调节激光光束, 使其正入射至探测系统探头的中央部位;
- 5.2.2.4 按时间间隔测量并记录一次探测系统的读数 P_i , 重复测量 m 次, 按式 (2) 计算平均输出功率, 按式 (3)、式 (4) 计算输出功率的不稳定度 S_p 。测量持续时间、采样时间间隔应按以下要求选择:
- 1) ——短期不稳定度的测试中, 整个测量持续时间不小于 1 s, 每隔 10 μ s 采样一次, 探测系统的时间常数应该不大于 3 μ s;
 - 2) ——中期不稳定度的测试中, 整个测量持续时间不小于 1 min, 每隔 100 ms 采样一次, 探测系统的时间常数应该不大于 30 ms;
 - 3) ——长期不稳定度的测试中, 整个测量持续时间不小于 1 h, 每隔 10 s 采样一次, 探测系统的时间常数应该不大于 3 s。

$$\bar{P} = \frac{1}{\tau_s} \cdot \frac{1}{\tau_z} \cdot \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$\bar{P}$ —— m 个功率测量值的平均值, 单位为 W;

τ_s ——衰减器透射比;

τ_z ——窄带滤光片透射比;

m ——测量次数;

P_i ——第 i 次测得的功率, 单位为 W。

$$P_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - \bar{P})^2}{m-1}} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

P_σ ——功率标准差, 单位为 W。

$$S_p = \frac{2P_\sigma}{\bar{P}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中:

S_p ——输出功率不稳定性。

5.3 稳定出光时间

5.3.1 测试图

按照本标准 5.1.1 规定执行。

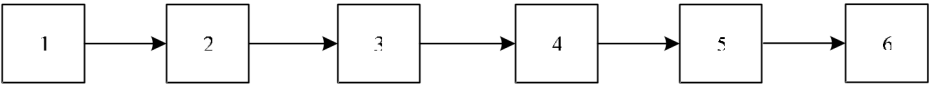
5.3.2 测试步骤

- 5.3.2.1 按 5.1.1 搭建测试装置，并按照测试设备要求进行通电预热。
- 5.3.2.2 根据激光器的额定功率选用对应量程，宜采用额定功率 1.5 倍至 5 倍量程，并校准其零点。
- 5.3.2.3 根据激光器的光束尺寸，调节激光光束，使其正入射至激光功率计探头的中央部位。激光功率计的响应时间常数应不大于 30 ms。
- 5.3.2.4 启动激光器，将其设定为额定功率输出，每隔 100 ms 测量并记录一次功率计的读数 P_i 与时间 T_i ，直至关闭激光器。
- 5.3.2.5 根据记录的功率 P_i 、时间 T_i 数据，采用线性插值法获得“功率—时间”曲线。
- 5.3.2.6 根据“功率—时间”曲线，确定输出功率上升和下降到额定功率 90% 的功率点之间的时间间隔，若存在多次上升或者下降，则取最小的时间间隔作为稳定出光时间。

5.4 峰值波长

5.4.1 测试图

测试图见图 3 峰值波长测试图。



- 说明：
- 1——被测激光器；
 - 2——光闸（必要时）；
 - 3——衰减器（必要时）；
 - 4——滤光片（必要时）；
 - 5——透镜（必要时）；
 - 6——波长测量仪器。

图 3 峰值波长测试图

5.4.2 测试步骤

- 5.4.2.1 按 5.4.1 搭建测试装置，按照测试设备要求进行通电预热，并校准波长测量系统的透过率。
- 5.4.2.2 波长测量仪器调整至对应的功率测量范围、波长扫描范围、波长分辨率。
- 5.4.2.3 激光器输出额定功率的光束正入射到波长测量仪器（如：单色仪、光谱仪或波长计）中，并记录仪器测得的波长数据，找出峰值功率处的波长 λ_i ，重复测量 n ($n \geq 10$) 次，按式（5）计算峰值波长 λ ：

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \dots\dots\dots (5)$$

式中：

λ ——峰值波长，单位为 nm；

λ_i ——第 i 次测得的峰值波长，单位为 nm；
 n ——测量次数。

5.5 谱宽度

5.5.1 测试图

测试图见图 4 谱宽度测试图。



说明：
1——被测激光器；
2——光闸（必要时）；
3——衰减器（必要时）；
4——滤光片（必要时）；
5——透镜（必要时）；
6——波长测量仪器。

图 4 谱宽度测试图

5.5.2 测试步骤

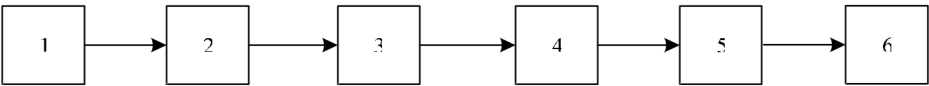
- 5.5.2.1 按 5.5.1 搭建测试装置，并按照测试设备要求进行通电预热。
- 5.5.2.2 光谱仪选择合适的功率测量范围、波长扫描范围、波长分辨率。
- 5.5.2.3 激光器输出额定功率的光束正入射到光谱仪波长测量仪器（如：单色仪、光谱仪或波长计）中，使激光光束全部进入光谱仪波长测量仪器，记录“功率—波长”（谱功率）曲线，取功率最大值的一半所对应波长点（或频率）的最大间隔作为谱宽度。

5.6 光束质量

5.6.1 光束质量 M^2 因子

5.6.1.1 测试图

测试图见图 5 光束质量 M^2 因子测试图。



说明：
1——被测激光器；
2——准直器（必要时）；
3——光束衰减器（必要时）；
4——光谱滤波器（必要时）；
5——光束变换系统（必要时）；
6——面阵探测器。

图 5 光束质量 M^2 因子测试图

5.6.1.2 测试步骤

被测激光光束经过光束衰减器、光谱滤波器和光束变换系统后直接入射到面阵探测器上，获得每一帧的光斑强度分布，根据强度分布计算出光斑直径或宽度，并记下面阵探测器在光轴上的位置，沿光轴移动面阵探测器，测得光轴上另外多个位置处的光斑直径或宽度。根据光斑位置、光斑直径的数据，拟合得到被测光束的特征参数 A、B、C，进一步根据公式计算光束质量 M2 因子。

具体测试步骤如下：

- 调整光束变换系统，使得被测激光束正入射到面阵探测器上，并且面阵探测器一维方向上所测光束覆盖的光敏像素数大于或等于 100；根据被测光束的光强和面阵探测器的动态范围，选择光束衰减器的衰减倍率，使得面阵探测器测得的光斑图像的峰值光强处于动态范围的三分之二以上，但不饱和；采用光谱滤波器，滤除杂光。
- 启动激光器，按照测试需求调节其输出功率，接通面阵探测器的电源，并校准其零点。
- 调节激光光束，使激光束经过光束变换系统后，准直的正入射至面阵探测器的中央部位，采集光斑强度分布，并记录面阵探测器在光轴上的位置；沿着光轴方向移动面阵探测器，测得光轴上另外多个位置处的光斑强度分布，注意不要将面阵探测器移出光束的准直范围。在光束的束腰两侧准直距离内至少各测三组光斑位置、光斑强度分布的数据。
- 关闭激光器，面阵探测器采集背景图像，采集帧数应大于 50 帧，计算平均本底帧和噪声标准差。
- 将采集到的光斑强度分布扣除平均本底帧和噪声标准差，处理方法按照处理方法见 ISO 11146-3 执行。以光斑强度分布的一阶矩质心为中心，以光轴方向为 Z 轴正方向建立圆柱坐标系，将第 i 次测得的光斑强度分布表示为 $I(r, \varphi, z_i)$ 的形式。根据式 (6) 计算各个光斑的二阶矩直径或二阶矩宽度 d_i 。将各组光斑位置、光斑直径的数据 (z_i, d_i) 带入式 (7)，采用最小二乘法拟合得到被测光束的特征系数 A、B、C，将特征系数 A、B、C 带入式 (8) 和式 (9) 分别求得被测光束的束腰直径 d_0 和远场发散角 θ ，将束腰直径 d_0 和远场发散角 θ 带入式 (10) 求得光束质量 M^2 因子。

$$d_i = 2 \sqrt{\frac{\iint 2r^2 \cdot I(r, \varphi, z_i) r dr d\varphi}{\iint I(r, \varphi, z_i) r dr d\varphi}} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

d_i ——第 i 次测得的光束宽度或光斑直径；

r ——圆柱坐标系下的矢径；

φ ——圆柱坐标系下的极角；

z_i ——第 i 次测量时面阵探测器在 Z 轴上的位置；

$I(r, \varphi, z_i)$ ——第 i 次测得的光斑强度分布扣除平均本底帧和噪声标准差后的极坐标表示。

$$d_i^2 = A + B \cdot z_i + C \cdot z_i^2 \dots\dots\dots (7)$$

式中：

A——光束的特征系数；

B——光束的特征系数；

C——光束的特征系数。

$$d_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

d_0 ——被测光束的束腰宽度或束腰直径；

$$\theta = \sqrt{C} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

θ ——被测光束的远场发散角（全角）；

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot d_0 \cdot \theta \dots\dots\dots (10)$$

式中：

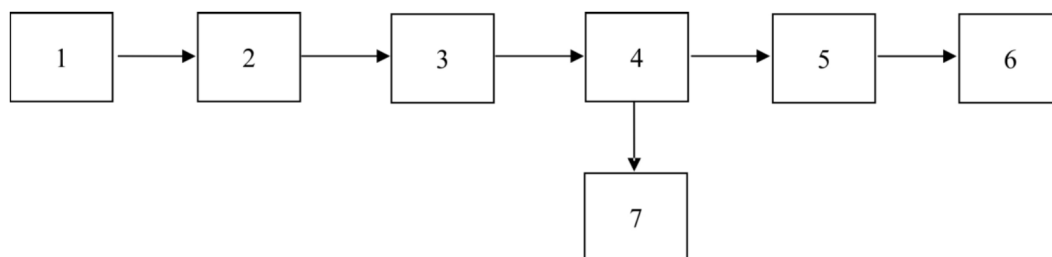
M^2 ——光束质量 M^2 因子；

λ ——被测激光束的峰值波长；

5.6.2 光束质量 β 因子

5.6.2.1 测试图

测试图见图 6 光束质量 β 因子测试。



说明：

1——被测激光器；

2——光束衰减器（必要时）；

3——光谱滤波器（必要时）；

4——分束器；

5——光束变换系统，等效焦距为 f ；

6——远场面阵探测器；

7——近场面阵探测器。

图 6 光束质量 β 因子测试图

5.6.2.2 测试步骤

被测激光束经过光束衰减器、光谱滤波器和分束器后被分为两路，一路经过光束变换系统后，聚焦于远场面阵探测器上，获得每一帧远场光斑强度分布，根据强度分布计算出被测激光束的远场光束直径或光束宽度；另一路进入近场面阵探测器，同步获得每一帧近场光斑强度分布，根据近场强度分布计算出被测激光束的近场光束直径或光束宽度，进一步计算得到理想光束的远场光束直径或光束宽度。根据被测激光束的远场光束直径或光束宽度以及理想光束的远场光束直径或光束宽度，计算得到光束质量 β 因子。

具体测试步骤如下：

- a) 调整光束变换系统, 使得一维方向上所测光束覆盖的光敏像素数大于或等于 100; 根据被测光束的光强和两个面阵探测器动态范围, 选择光束衰减器和分束器, 使得两个面阵探测器测得的光斑图像的峰值光强处于动态范围的三分之二以上, 但不饱和; 采用光谱滤波器, 滤除杂光。
- b) 启动激光器, 按照测试需求调节其输出功率, 接通远场面阵探测器和近场面阵探测器的电源, 并校准其零点。
- c) 将远场面阵探测器置于光束变换系统的焦面上, 调节激光光束, 使一路激光束经过光束变换系统后, 正入射至远场面阵探测器的中央部位, 采集远场光斑强度分布, 同时使另一路激光束正入射至近场面阵探测器的中央部位, 采集近场光斑强度分布。
- d) 关闭激光器, 两个面阵探测器采集背景图像, 采集帧数应大于 50 帧, 计算平均本底帧和噪声标准差;
- e) 将采集到的远场光斑强度分布和近场光斑强度分布分别扣除平均本底帧和噪声标准差 (处理方法见 ISO 11146-3:2004 第 3 章)。以远场光斑强度分布的一阶矩质心为中心建立极坐标系, 将远场光斑强度分布表示为 $I_F(r, \varphi)$, 根据式 (11) 计算出光束的远场二阶矩直径或二阶矩宽度。以近场光斑强度分布的一阶矩质心为中心建立极坐标系, 将近场光斑强度分布表示为 $I_N(r, \varphi)$, 根据式 (12) 计算出光束的近场二阶矩直径或二阶矩宽度, 根据式 (13) 计算得到理想光束的远场直径或宽度。根据式 (14) 计算光束质量 β 因子。

$$d_{\text{real}} = 2 \sqrt{\frac{\iint 2r^2 \cdot I_F(r, \varphi) r dr d\varphi}{\iint I_F(r, \varphi) r dr d\varphi}} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

d_{real} ——被测光束的远场光束直径或光束宽度;

r ——极坐标系下的矢径;

φ ——极坐标系下的极角;

$I_F(r, \varphi)$ ——扣除平均本底帧和噪声标准差后的远场光斑强度分布的极坐标表示。

$$D = 2 \sqrt{\frac{\iint 2r^2 \cdot I_N(r, \varphi) r dr d\varphi}{\iint I_N(r, \varphi) r dr d\varphi}} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

D ——被测光束的近场光束直径或光束宽度;

$I_N(r, \varphi)$ ——扣除平均本底帧和噪声标准差后的近场光斑强度分布的极坐标表示;

$$d_{\text{ref}} = 2.44 \frac{\lambda}{D} \cdot f \dots\dots\dots (13)$$

式中:

d_{ref} ——理想光束的远场光束直径或光束宽度;

λ ——被测激光束的峰值波长;

f ——光束变换系统的等效焦距。

$$\beta = \frac{d_{\text{real}}}{d_{\text{ref}}} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

β ——光束质量 β 因子。

5.7 激光器装置效率

5.7.1 测试图

激光器输出功率测试同 5.1.1，电功率测试应采集激光器所有组件的消耗电功率。

5.7.2 测试步骤

5.7.2.1 激光器装置效率测试与稳定出光时间测试同时进行；

5.7.2.2 按 5.1 节的规定用功率计测量激光器的输出功率，用电功率表测量激光器的全部输入电功率；

5.7.2.3 在稳定出光时间内，均匀记录激光器输出功率和输入电功率值，记录次数不少于 n 次 ($n \geq 20$)，按式 (15) 计算效率。

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^n P_{\text{out}j}}{\sum_{j=1}^n P_{\text{inj}}} \times 100\% \dots\dots\dots (15)$$

式中：

η ——激光器装置效率；

$P_{\text{out}j}$ ——激光器的输出功率第 j 次记录值，单位为 W；

P_{inj} ——激光器的全部输入电功率第 j 次记录值，单位为 W。

6 测试报告

测试报告应包括以下内容（包括但不限于）：

- a) 测试时间、测试地点、测试项目、测试依据、测试人员、审核人员、委托测试单位；
- b) 被测激光器的生产厂商、型号、编号；
- c) 测试条件；
- d) 测试结果。