

阈值法测量激光束发散角

于淑范 李俊书

(西南技术物理所)

本文介绍一种阈值法测量激光束发散角的原理、装置和测量方法。该装置操作简单、数据处理快速,是一种实用的方法。

一、前言

近年来,激光已获得广泛应用,在许多应用中,如激光测距、打孔、焊接和切割等,均对激光束的质量有着严格的要求。

激光束的一个重要参数是光束的发散角,发散角小,光束能量集中,反之就差。

测量激光发散角常用的方法有:套孔法、尖劈法、远场光束直接照相等,这些测量方法都各有优缺点。但从装置简单、操作方便、数据处理快速而论,本文介绍的阈值法则是一种较为实用的方法。

二、原理

所谓阈值法就是激光束经过一系列不同透过率的中性密度衰减片(其中一片为标准片,透过率 $T_0 = 1/e^2$),再经过一长焦距透镜,将激光束准确地聚焦于放置在焦平面处的感光照相黑纸上。这时,如果透镜焦点处的光强正好是黑纸的反应阈值,抽去标准片后,再打一个光斑,其大小除以透镜的焦距就是脉冲激光束的发散角。在实际测量时,先放进包括标准衰减片在内的一定数量不同透过率的衰减片,试打一次激光光斑,根据有无光斑,酌情增、减衰减片,再作试验,激光强度随之变化,在相纸上将打出一系列不同的烧灼光斑,这个过程要进行到刚刚能在相纸上打出光斑,即进行到相纸的“阈值”时为止,再把衰减率增加5%。此时从系统中抽去标准片,打三至四个光斑,用读数显微镜测出此光斑直径大小,若透镜焦距长度 f 已知,求出各斑点直径 d 的平均值 \bar{d} ,即可求得光束强度发散角 θ ,用公式表示为:

$$\theta = \frac{\bar{d}}{f}$$

由定义知:强度发散角是指远场光强度分布曲线上光强度为峰值的若干分之一范围内所对应的全角。一般是指峰值的 $1/e^2$ (~13.5%)范围所确定的角度。如图1所示。

如果我们把激光束的空间强度分布看作理想的高斯分布,进一步又把高斯强度分布线性化为三角形强度分布进行分析,如图2所示。

收稿日期:1987年5月13日。

由图2, 令三角形的强度分布为AHC、C点表示光强峰值 I_0 。根据定义, 假定三角形中

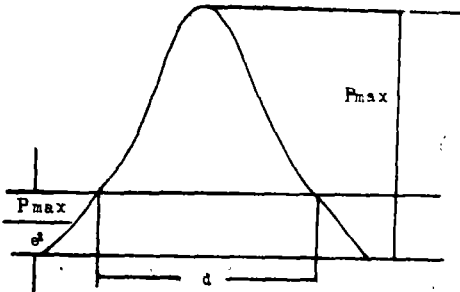


图1 强度发散角

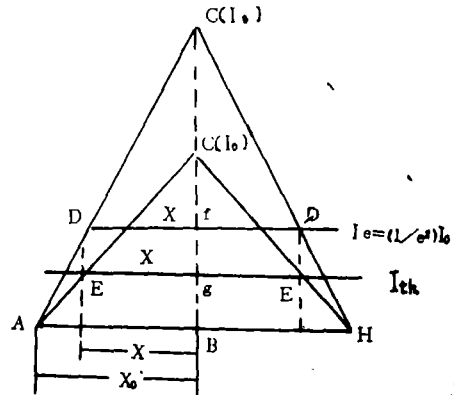


图2 线性化为三角形分布

的 DD' 点间所确定的角度就是 I_0/e^2 所确定的强度发散角, DD' 点处的光强 $I_0 = I_0/e^2$ 。假定相纸的阈值强度 $I_{th} = (T_0 T_1 T_2 \dots T_n) I_0$ 。 T_0 是标准片的透过率为13.5%, $T_1 T_2 \dots T_n$ 是不同透过率的衰减片。抽掉标准片后 C' 光强峰值为 I_0' , 则 $I_0' = I_0 T_1 T_2 \dots T_n$, 三角形 AHC' 表示抽掉标准片后的光强分布, DD' 是 I_0/e^2 点间所对应的范围, 而 EE' 的长度就是在相纸上打出的光斑直径。如果我们能证明 EE' 的长度等于 DD' 的长度, 那么光斑的大小就是 I_0/e^2 点间距离所确定的直径 d 。由图2知:

令 $Df = x$, $Eg = x'$, $AB = x_0$, 由 $\triangle ABC$ 和 $\triangle Dfc$ 有如下的关系:

$$\frac{x}{x_0} = \frac{cf}{cB} = \frac{I_0 - I_0}{I_0} = \frac{I_0 - I_0 T_0}{I_0} = 1 - T_0 \quad (1)$$

又由 $\triangle ABC'$ 和 $\triangle Egc'$ 有如下关系:

$$\frac{x'}{x_0} = \frac{c'g}{c'B} = \frac{I_0' - I_{th}}{I_0'} = \frac{I_0 T_1 T_2 \dots T_n - I_0 T_0 T_1 T_2 \dots T_n}{I_0 T_1 T_2 \dots T_n} = 1 - T_0 \quad (2)$$

由(1)、(2)两式可以得出 $x = x'$, 同理可证明: $fD' = gE'$, 所以 $DD' = EE'$ 。

由图2表明: 由光强分布 $\triangle AHC'$ 与相纸阈值线的交点范围能在相纸上打出损伤斑点, 其长度为 EE' , 而 $EE' = DD'$, DD' 为定义 I_0/e^2 所确定的直径。所以, 阈值法所打出的斑点大小正确的反映了强度发散角定义点处的直径大小。这就表明了阈值法测量脉冲强度发散角原理上是正确的。

三、实 验 装 置

测量装置如图3所示:

1. 衰减片材料的选择和加工

我们从生产厂现有玻璃材料中, 选择了多种牌号的中性密度玻璃, 这些材料光谱特性曲线各不相同。选择不同材料, 可使这些衰减片不致过厚, 也不致太薄而适于加工。在这些衰减片中, 对标准片的要求是比较严格的, 应满足13.5%的透过率。我们根据

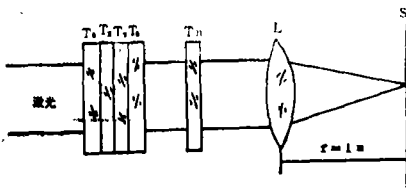


图3 阈值法测量激光强度发散角原理图。
 T_0 是标准片的透过率13.5%; $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ 为不同透过率的衰减片; f 是透镜焦距, 为1 m; s 是焦平面处的相纸

AB₂玻璃光谱特性曲线在1.06 μm 处的透过率,计算得到的玻片厚度为5.4mm,磨好后用分光光度计在1.06 μm 波长上标定其透过率为15%,修磨后厚为5mm($\phi 30 \times 50\text{mm}$)平行差小于1'。为了更准确地确定标准片的透过率,将修磨后的片子用脉冲激光测试,得透过率为13.6%,基本满足要求。其它衰减片磨成不同厚度的玻片,并标定了透过率,其中两块透过率分别为94%,94.5%(材料为k₉玻璃,一面镀增透膜)。

2. 透镜焦距的选择

一般脉冲激光束的发散角都在零点几到几个毫弧度,为便于计算,我们选用焦长为1m的透镜。因此,测出的光斑大小(为毫米单位),就是光束发散角的毫弧度数。

要求透镜的象差要小。

3. 盛片盒

设计了一个放置和取出衰减片都方便的、方位和俯仰可调的盛片盒。二维调节机构能调节衰减片高低和俯仰。

四、实验结果

1. 用不同损伤阈值的相纸测量激光发散角

我们采用三种不同损伤阈值的相纸,编号为A、B、C,对同一激光输出功率进行测量,C种相纸损伤阈值比较低,A种次之,B种最高。激光器为平-平腔,腔长340mm,电光调Q,其单脉冲输出能量为117.8mJ。

为提高测量精度,相纸的损伤阈值及所测得光斑大小均在读数显微镜下观察和测量。为消除因激光功率波动带来的误差,分别测四点,取平均值计算发散角。表1列出了三种不同的相纸测量激光强度发散角的结果。

理论证明不同损伤阈值的相纸对测量发散角应无影响。实验结果表明,三种相纸所测结果引起的误差较小。

用同样的方法,对虚共焦非稳腔激光器光束发散角进行了测量,采用实际腔长340mm,电光调Q,输入22.7J时,输出为95mJ,用三种相纸进行了测量,结果见表2。

表 1

相纸 种类	光斑直径(mm)					强度发散角 θ (mrad)
	d_1	d_2	d_3	d_4	\bar{d}	
A	1.42	1.63	1.55	1.55	1.54	1.54
B	1.57	1.41	1.39	1.45	1.46	1.46
C	1.45	1.52	1.41	1.42	1.45	1.45

表 2

相纸 种类	光斑直径(mm)					强度发散角 θ (mrad)
	d_1	d_2	d_3	d_4	\bar{d}	
A	0.53	0.58	0.58	0.57	0.56	0.56
B	0.59	0.58	0.62	0.64	0.61	0.61
C	0.59	0.56	0.49	0.55	0.54	0.54

表2数据也表明三种不同损伤阈值的相纸测得的激光发散角的差别很小。

2. 测量结果

用人眼分辨相纸上光斑斑点时,测得上述虚共焦非稳腔发散角为0.61mrad,而用读数显微镜来辨定阈值时,测得发散角为0.56mrad。可见两者相对误差约为9%。

五、误差估计

根据发散角 $\theta = d/f$ 这个基本公式对测量带来的误差进行估计, 所测得的发散角为 θ , 由测量带来的误差为:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta d}{f} + \frac{d}{f^2} \Delta f$$

式中, d 为光斑直径; f 为透镜焦距; Δf 焦距误差; Δd 由多种因素引起的光斑误差。可表示为 $\Delta d = \Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 + \Delta d_4 \cdots$ 。

从增量公式中可以看到第二项中 d 和 Δf 两者都是毫米量级, 而 f 是以米为量级, 第二项相对第一项来说是可以忽略不计的。从公式 $\Delta\theta \approx \Delta d/f$ 中, Δd 这个光斑误差是由下列几种因素引起的。

1. 相纸损伤阈值的判定引起的误差 Δd_1 , 从我们实验中可以看到, 人为造成判读同一相纸阈值光斑带来的误差, 如前测量结果可以看到, 相对误差为9%。

2. 读数带来的误差 Δd_2 。在测量时, 人眼观察斑点的边缘不能很准确, 从而会带来一定的测量误差, 估计误差约为2~3%左右。

3. 功率波动可能带来的误差, 若采用每测四次取平均值的方法, 粗略估计给发散角带来的误差最多为1~2%。

4. 测量仪器的误差 Δd_4 , 所用读数显微镜测量误差小于千分之一, 所以仪器误差可以忽略不计。

因此, 总误差约为 $\pm 15\%$ 左右。

六、结束语

1. 阈值法测量激光强度发散角原理上是正确的。从理论上讲测量激光发散角与相纸阈值无关, 实际测量结果有一定的误差, 但都在允许误差范围内。

2. 脉冲激光输出功率波动是不可避免的。为减小因功率波动带来的误差, 测量时取3~4点的平均值。

3. 人眼分辨会对测量带来一定的误差, 虽然借助读数显微镜, 但各人视力仍有差别, 测量结果最大可能出现的相对误差为9%, 另外读数可能带来2~3%的误差。所以, 我们认为此方法的精度约 $\pm 15\%$ 是正确的。

4. 我们认为本装置结构简单, 操作方便, 数据处理快速, 作为脉冲激光发散角的相对测量是一种实用的方法。

参考文献

[1] AD-758, 343.

Divergence angle measurement of a laser beam by the threshold method

Yu Shufan Li Junshu

(Southwest Institute of Technical physics)

变。如果减小发射与接收系统的透过损耗，还可提高测程。由此可见，我们研制的这种平凸谐振腔组件式激光器件，除了体积小，重量轻外，它工作稳定，发散角小，测距能力强。在国内，平凸谐振腔组件式激光器件未见公开报道；从通信与激光学术交流会上知，目前，平凸谐振腔组件仅为三件式组件，即组件由平凸全反射镜、BDN染料调Q片和YAG晶体三件组成。而我们的平凸谐振腔组件为四件式，即由前述的平凸全反射镜、BDN染料调Q片、YAG晶体和平凸校正透镜四件组成。虽然四件式组件仅比三件式多一个光学件，但调校装配比三件式困难得多，而且调校方法也较特殊。因此，四件式组件在国内还是第一次尝试，并且成功地装配于整机中，收到了良好的效果。

参 考 文 献

[1] 赫光生、雷仕湛，《激光器设计基础》，上海科学技术出版社，1979年，第42~46页。

A small laser device with plano-convex resonant cavity module

Zhu Lianxin

(Design Institute of Optical Instrument Factory of Yungnan)

Abstract

A small laser device with plano-convex resonant cavity module, which has stable output energy, small divergence angle, high ranging power, small bulk and light weight is described.

作者简介：朱连新，男，1940年6月出生，工程师。现从事激光器设计研制工作。

(上接第51页)

Abstract

A Principle, method and instrument for laser beam divergence measurement by means of the threshold method are described. The instrument is easy to operate and fast to process data. The method is practical.

作者简介：于淑范，女，1953年6月出生，助理工程师。曾参加激光医疗机研制工作，该成果1986年获部级科技进步二等奖。现从事激光器件及其应用研究。

李俊书，男，1934年7月出生，高级工程师。曾参加激光医疗机及椭圆腔的研制，该两项成果1986年获部级科技进步二等奖。现从事激光器件及其应用研究。