

固体激光技术基础丛书之五

激光参数测量

《激光参数测量》编写组



上海人民出版社

固体激光技术基础丛书之五

激光参数测量

《激光参数测量》编写组

上海人民科技出版社

固体激光技术基础丛书之五

激光参数测量

本书编写组编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 3.875 字数 83,000

1976年6月第1版 1976年6月第1次印刷

统一书号: 15171·241 定价: 0.26 元

毛主席语录

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

对情况和问题一定要注意到它们的数量方面，要有基本的数量的分析。任何质量都表现为一定的数量，没有数量也就没有质量。

前 言

无产阶级文化大革命以来，群众性激光科研活动蓬勃开展，激光技术在工农业生产、医疗卫生、科学研究以及国防建设等方面的应用日益广泛，并不断取得可喜的成果。在普及和提高激光技术的过程中，激光参数测量技术起着重要的作用。

人们为了全面地掌握激光器的特点及其内在规律，需要从各个不同的侧面来测量激光器的有关参数，有效地把激光技术广泛地应用到生产实践中去。根据具体情况，我们既可以测量激光器输出光束的各种参数，如：能量、功率、发散度、波长、谱线宽度、相干性等，也可以测量反映激光器内部作用过程的参数，如：增益、损耗、形变、弥散、模谱、噪声等。由于激光具有高亮度、窄的谱线宽度、宽的光谱区域和宽的脉冲宽度范围等特点，为测量上述参数，不仅需要改进和扩展原有的测量技术，而且需要建立新的测量原理和发展新的测量方法。

本书简要地介绍了测量激光的能量、功率、发散度、波长、谱线宽度、相干性、频率稳定性和增益的原理与方法。对于激光超短脉冲的某些参量、材料非线性常数等的测量方法及某些常用的测试装置，如高速照相机等，没有编写进去，有兴趣的读者可参阅有关资料。书中存在的缺点和错误欢迎读者批评指正。

《激光测量》编写组

一九七五年十一月

目 录

| | |
|-------------------------|-----|
| 第一章 激光能量测量 | 1 |
| 第一节 光热法 | 1 |
| 第二节 光电法 | 11 |
| 第三节 光压法 | 15 |
| 第二章 功率测量 | 18 |
| 第三章 方向性测量 | 21 |
| 第一节 套孔法 | 22 |
| 第二节 光楔法 | 23 |
| 第三节 圆环法 | 29 |
| 第四章 激光波长的光谱测量 | 33 |
| 第一节 棱镜光谱仪 | 40 |
| 第二节 光栅光谱仪 | 44 |
| 第三节 法布里-珀罗干涉仪和标准具 | 56 |
| 第五章 谱线宽度及其测量 | 71 |
| 第一节 谱线宽度的来源 | 72 |
| 第二节 谱线宽度的测量方法 | 82 |
| 第六章 激光的相干性及其测量 | 93 |
| 第七章 激光的频率稳定性及其测量 | 100 |
| 第八章 增益及其测量 | 110 |

第一章 激光能量测量

激光参数测量是激光技术中的一门重要课题。随着激光事业的飞速发展，对于激光参数的定量测量也越来越显得重要了。伟大领袖毛主席教导我们：“对情况和问题一定要注意到它们的数量方面，要有基本的数量的分析。”激光器的特性用数量的概念测量出来，能有助于对激光器工作的一系列物理规律的探索，并且在对激光器的使用范围和程度上，可用数量这一概念来估价。特别是群众性激光科研活动开展以来，更加迫切需要一批性能上可靠，使用上简便的测量仪器。

在激光器刚刚诞生的时候，第一批的测量仪器是由光度计和辐射计临时改制而成的。但是随着三大革命实践的发展，新的测量方式，以及新的测量仪器业已成熟，并对激光器件的发展作出了重要的贡献。

测量激光能量的方法有多种，按激光光束在接收元件上所产生的物理效应可分为：光热法、光电法以及光压法三种。

第一节 光 热 法

光热法是基于光的热效应，选择合适的物质作为吸收体，根据辐射被它吸收后所引起的温度变化情况，或者进行温度测量，或者转为别的物理参量来指示，便可得出光能的度量。

这类仪器的结构、标定和使用情况下面将分别讨论。

吸收体的形状有平盘式的，也有圆锥形斗式的。前者常

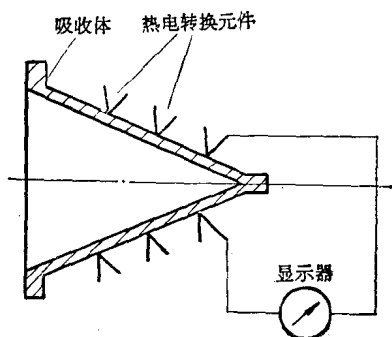


图1 炭斗量热器的原理结构

用于大口径光束或发散光束的测量。应当指出，对于反射率较高的材料来说，不宜做成平盘式形状，除非在其表面上再喷涂或蒸镀一层反射率低材料，如金黑、烟黑或胶体石墨等，否则由于辐射的反射损失较大，会引起较大的测量

误差。如果把接收面做成圆锥形斗状的样子，由于入射光束能够多次被反射和吸收，因而几乎可以吸收全部的入射能量。除此之外，还有空腔体热式，液体体热式及热阻式等等。

吸收体及其形式的选择固然重要，但在制作成能够用来测量辐射能量的仪器时，还必须选用合适的热电转换元件及性能匹配的显示设备。

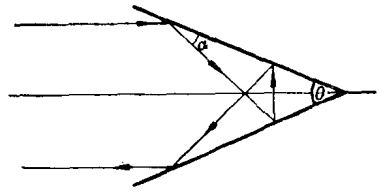
1. 圆锥形斗状量热器(即炭斗量热器)

如上所述，接收面做成圆锥形，入射光束可进行多次地反射和多次被吸收。如果给出接收体的圆锥角大小与入射光束在其中可能经受反射的次数之间的关系，那就会对这种形状的设计有进一步的了解。为简单起见，设圆锥的内表面是理想的镜反射面，待测光束沿着它的轴向入射，若所设计的锥角 θ 满足如下关系：

$$\theta = \frac{180^\circ}{n}$$

则这束光便在圆锥的内壁上经受 n 次反射之后而逸出。

假定锥壁的反射率为 R ，或吸收率 $A=1-R$ ，那么光束在其中经 n 次反射后的总吸收比便为 $A'_{\text{总}}=1-R^n$ 。通常比较典型的锥角设计为： $\theta=20^\circ$ 、 30° 和 45° 等，相应的反射次数便为 $n=9$ 、 6 和 4 。



这对于锥壁反射率 $R=10\%$ 图 2 在圆锥体中的光束吸收示意图的情况来说，总的吸收比 $A_{\text{总}}$ 几乎接近于 1。当然，实际的锥壁不可能为理想镜面，因而必须考虑到一定程度的漫反射影响的存在。这样，估计所得到的总吸收比与一次反射率的差异要适当减少些。

比较广泛被采用的一种作为吸收体的材料是质地细腻的光谱纯石墨。它的特点在于，吸收率高，光谱响应没有选择性，因而能适用于较宽波段范围的辐射能量检测。这种由石墨制成的圆锥形斗状吸收体，通常叫做炭斗。

较之平面盘状卡计，锥形斗状卡计对于一定孔径的光束，它的拦截面积要大些，同时由于吸收体积也较大，因而热平衡时间也要长些。结果是面吸收率下降，承载能力较高，而灵敏度较低。由热力学定律可知吸收体的热量变化 ΔQ 与温差 ΔT 之间的关系为：

$$\Delta Q = MC\Delta T$$

式中 M 是吸收体的质量， C 为比热。

但是，实际在测试系统中所反映出的吸收体的温度变化，由于建立平衡过程的同时存在着热量的耗损，因而导致能量测量的误差出现。原则上说，热量的损失主要来自三个方面：一是吸收体本身的辐射损耗 $\beta_{\text{辐射}}$ ，二是由于周围空气对流所

引起的热耗损 $\beta_{\text{辐射}}$ ，三是发生在与吸收体接触处的元件之间热传导损失 $\beta_{\text{传导}}$ ，等等。

量热器本身虽然存在上述热过程引起的各种测量误差，但是实际使用时注意到尽可能保持定标时的条件，这误差就成了仪器本身的特征参量而不反映在读数上。不过，要做到这一点确实是困难的，何况所探测的光束均匀度也不同再加上炭斗壁加工不均匀以及热电转换元件的布置情况都对测量误差有明显的影响。因此，考虑到仪器的测量误差是必要的。

(1) 热电转换元件

热电转换的元件有多种，例如热敏电阻、半导体热电偶、金属热电偶等。为了获得灵敏度高、稳定性好、并且电信号随温度呈线性或有规律变化的热电转换元件，目前在炭斗量热器中，最常用的热电转换元件是金属热电偶和半导体热电偶两种。这是因为，虽然热敏电阻的灵敏度高，但电阻按指数律随温度变化，给测量带来了一定的麻烦。半导体热电偶的灵敏度也较高，其热能转换成电能的效率高达 6% 以上，而金属热电偶的热电转换效率仅在 1% 以下，因此它是一个很有希望的热电转换元件。

金属热电偶的灵敏度略为低些，但是由于它的线性范围宽，稳定性好，材料来源方便等成了炭斗量热器的最常用的热电转换元件。金属热电偶的低灵敏度，可以用多个热电偶串接的方法来解决。目前常用的金属热电偶有铜-康铜，镍铬-康铜等。

在用金属热电偶准确地测量吸收体上升温度时，必须将热电偶的热端紧附在吸收体的锥壁上。在这同时，为了防止热电偶被石墨导体短路，在接触处要涂上一层薄薄的绝缘层。热电偶的冷端可附在一块表面经过氧化的电绝缘的良散热体

上,或者冷端接点的金属尽可能地大,以减少零点漂移。量热器的零点(即吸收体在测量前的温度)稳定,可使测量的精度大大提高。

热电偶的等效特征是一个定压源,因此串接热电偶,可使输出电压增加。但是,如果热电偶的输出直接用检流计显示时,那么量热器的灵敏度并不一定增加,有时反而降低。这是因为内阻(即热电偶的串接总电阻)的增加,致使定压源输出功率。为了降低内阻,必须选择一定线径,一定个数的热电偶,同时与一定阻抗的检流计匹配,以获得最佳的热电转换效果。

(2) 显示设备

吸收体在吸收了激光能量后,由热电偶给出的电压信号是微弱的。要显示这样弱的电压信号,常常需要有高灵敏度的显示设备。目前常用的显示设备有光点式检流计、多次反射式检流计和晶体管灵敏电流计等。

光点式检流计和多次反射式检流计的灵敏度都很高,有的高达 10^{-10} 安/毫米。但是由于每个检流计的参量各不相同,因而在量热器定标后均不可互换代用,而且该类装置不便携带。晶体管灵敏电流计除了可达到很高的灵敏度外,还可以克服上述两种检流计的不足之处。

必须指出的是,由于吸收体的时间响应较长,一般为“秒”数量级。因而对于毫秒以至更短的激光脉冲来讲,吸收体已对激光脉冲的瞬时能量积分,所以显示装置可直接读出激光能量的输入值。

以上就是炭斗量热器作为测量仪器时,各部分的原则考虑。

炭斗量热器用于定量的测量,还需要一个定标的过程。用

标准功率灯可以进行定标。标准功率灯是一个发光功率比较稳定的钨丝灯,它在一定的电流下,在单位立体角内的发光功率是用绝对黑体辐射标准——黑体炉定标出来的。它是一个稳定的值。在标准功率灯前面放置一光阑(即快门),来控制曝光的时间,这样就使功率灯发射的光功率转换成光能量入射到炭斗量热器内,如图3所示。对于标准灯这个真实的光源,如果灯丝本身的线度和距离相比小得多时(一般其比值要小于0.1),那么,标准灯便能以较高的精确度遵循距离平方定律。这样,炭斗量热器接收到的能量 E 就可以用下列公式表示:

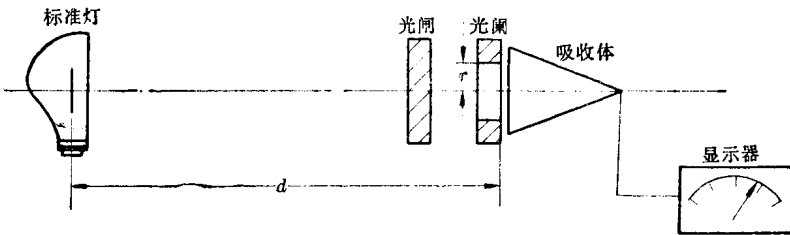


图3 用标准灯定标炭斗量热器的原理图

$$E = Pt \frac{\pi r^2}{d^2}$$

其中, P 是标准灯在使用电流下、单位立体角内的发光功率(瓦/立体角); d 是灯丝平面到光阑的距离(mm); r 是光阑的半径(mm); t 是曝光时间(sec)。

炭斗量热器的灵敏度将是在定标结束时给定的一个参量数,它的意义就是量热器接收1焦耳光能时显示设备的读数,或者是显示设备的每一单位读数所表示的光能值。

用标准灯进行定标方法较简单,但是由于定标时,吸收体接收光能的时间远长于实际工作的脉冲状态,因而引起的热损失就不一样,这样给定量测量带来了一些误差。

炭斗量热器是一种结构简单，使用方便的测量仪器。根据炭斗量热器的不同类型，能直接接收 10^{-2} 焦耳到几十焦耳的激光光能，并且能保持不大于 10% 误差的准确度。在测量大于几十焦耳的能量时，为了避免损坏吸收体，必须在量热器前插入吸收滤光片或漫反射薄片。为了在量热器工作时不受外来杂散光强的影响，在量热器前加上有色滤光片是有益的。例如对接收 1.06 微米的激光，为了消除可见光强引起的误差，通常使用 HWB₃ 或 HWB₄ 的滤光片，因这些滤光片几乎能滤去所有的可见光。

2. 鼠巢式量热器

这种量热器是用一团细铜丝作为测热元件。激光辐射就由这一团铜丝吸收，其吸收的能量通过导线的电阻变化来测量。由于铜的电阻与温度变化呈线性关系，因此使仪器的定量测量简单化了。同时，在导线体积中温度的分布并不影响电阻的变化，因此也就不需要等到温度分布均衡后才进行测量。为了有效的吸收，必须将一团细铜丝任意地放入一只内表面镀银的腔内（如杜瓦瓶等），同时，为了减小空气对流引起的热损失或测量的不稳定性，还应在腔上覆盖一块平面玻璃窗。在测量的过程中，常常将两个细铜丝测热元件（一个正常工作，一个用作补偿）接入电桥回路中，这样，用作补偿的量热器能使电流计因环境温度变化而引起的漂移为最小。在电桥中，当光束入射到工作的测热元件上时，在灵敏电流计上出现的不平衡直接与入射的光能

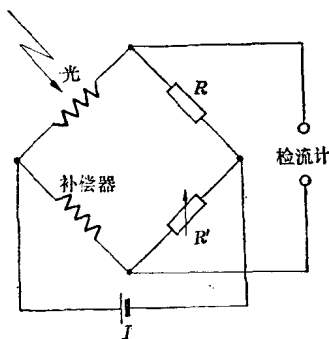


图 4 鼠巢式量热器测热原理图

输出值成比例。图 4 为鼠巢式量热器测热原理图。

落在测热元件上的能量与测热元件的电阻改变，可由下列方程推导而得。

设光在未达到前，导线上某一极小段的电阻为 R'_0 ，那末，当这一小段吸收了脉冲能量后的电阻为

$$R' = R'_0(1 + \alpha \Delta T)$$

式中 α 是电阻温度系数， ΔT 是所指那小段导线的温度变化。

可见，小段导线电阻的变化即为

$$\Delta R' = R'_0 \alpha \Delta T$$

而质量为 M' 的小段导线吸收了能量 E' 的温度变化为：

$$\Delta T = \frac{E'}{4.2M'C}$$

其中 C 为材料的比热。于是便有

$$\Delta R' = \frac{R'_0 E' \alpha}{4.2M'C}$$

测热元件的整个电阻变化等于它的各段电阻变化的总和。如果导线整个长度的截面是均匀的，那么， $\frac{R'_0}{M'} = \frac{R_0}{M}$ (R_0 和 M 分别是导线总长度的电阻和质量)。在温度变化不大的情况下， α 和 C 是与温度变化无关的常量，这样，测热元件整个电阻的变化可写为：

$$\Delta R = \frac{\alpha R_0 \Sigma E}{4.2MC} = \frac{\alpha R_0 E}{4.2MC}$$

这里的 E 是被吸收的全部能量。变换一下，即得

$$E = \frac{4.2MC}{\alpha R_0} \Delta R$$

上式表明，在测得了变化了的电阻 ΔR ，便可测到能量值。

在用计算的方法求得激光能量时，必须对这一等式进行一系列的修正。这是因为导线上的珐琅绝缘层增加了长度中每一段导线的比热。例如铜导线长 300m，直径 0.079mm，其绝缘层的厚度为 8μ ，绝缘层的比热等于 0.4 卡/克·度，密度为 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ，那么，单位长度的实际比热增长 29%。此外，还考虑到落在测热元件输入窗口上的反射（约 8%），和测热元件对光的反向散射（约 18%）等。所有这些导入量热方程的修正量，对于某一具体的装置来说，都是确定的。如果导线的整个比热用已知能量值的电容器对导线放电来测定，那么就可以不用计算由于绝缘层而带来的修正值。

当激光脉冲宽度为 1 毫秒，而能量密度高于 10 焦耳/厘米² 时，一般的珐琅绝缘层均遭受破坏，因此这时加入适当的衰减器是需要的。当然，在脉冲宽度较宽时，绝缘层承受的能量密度要大些。

由于鼠巢式量热器固有的时间响应约在 0.1 毫秒左右，并且其下降的时间较长，约为 10^2 秒，因此它在测量中无需等待热平衡，就能测出能量值。基于这一点，还可以用它来标定其他的光电接收器和功率测量器。

3. 液体量热器

这种量热器能承受较大的能量。这是因为固态吸收体表面被加热到几百度的辐射能量，在液态吸收体中，整个液体物质的温度仅升高几度。只要正确地选择介质的吸收特性及液层厚度，那么温度在吸收液体中的均衡是很容易由对流来实现的。

吸收体一般是选择对使用激光波长的吸收系数 α 大的溶液，例如硫酸铜溶液。除此之外，硫酸铜溶液的稳定性也高。为要全部地吸收入射的光能，可根据公式 $I = I_0^{-2l}$ 来确定液

层厚度 d 这一参量。在这公式中, I 为未被吸收的光强, I_0 为入射的光强。在精确估算时还应考虑容器反射面的影响。

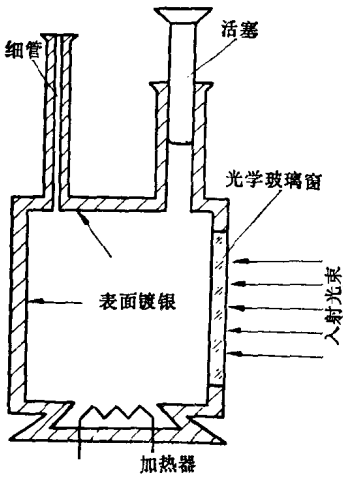


图5 液体量热器图

液体量热器的结构如图5所示。它是利用液体体积受热膨胀的原理制成的。液体在吸收了入射光能后体积增大, 增大了的体积 $V = V_0(1 + \beta \Delta T)$, 这里 V_0 为液体原来的体积, β 是液体的体膨胀系数。根据液体体积的增量 ΔV ($\Delta V = Sh$, S 是细管的面积, h 是细管上液面

变化的高度), 液体的质量 M , 比热 C , 我们便可得到如下关系:

$$E = \frac{4.2MCS}{\beta V_0} h$$

由此公式即可计算出入射能量 E 的大小。应当指出, 量热器上附加的活塞, 是用来控制由于周围环境温度的变化而引起细管的初始液面的起伏, 作为零点调节器。

用电能来标定是较为可靠的方法。通常加热丝位于液体量热器的下部, 当通过电流时, 加热的能量即为 $I^2 R t$, I 是流过加热丝的电流, R 是加热丝的电阻, t 是加热的时间。对于不同体积, 不同溶液的量热器都要经过一次重新标定。当然, 用热敏电阻也能测量液体量热器吸收的光能。运用这种方法测量时, 液体应置于受周围气温影响较小的容器里(如杜瓦

瓶等)。这样,用热敏电阻便能较精确地测得液体吸收光能的情况。

以液体作为吸收体测量的特点是:要使液体温度分布均衡后,才能读数。因此液体量热器就象炭斗量热器一样,在整个测量的过程中,存在着热损失的影响。

炭斗量热器、鼠巢式量热器和液体量热器,虽然它们的吸收元件各不相同,但接收原理都是由光能变成热的过程,因此统称为“卡计”。对于这类卡计,它们的结构都很简单,制作也较为容易。由于它们能量测量的范围很宽,并且有的卡计对不同波长的激光能量,可以有相同的灵敏度,因此,它们被广泛地应用在测量各种类型的激光器的输出能量上。

第二节 光 电 法

在光电效应中,用光能或光强与物质产生电流成比例的这一特性,可以实现激光能量和功率的测量。根据这种效应进行的测量称光电法。

用于光电法测量的元件有多种,主要地可分光电管和半导体光电元件两类。

光电管包括真空光电管、充气光电管和光电倍增管三种,它们的接受面能将入射的光子转换成电子,并在电路高压的作用下形成信号电流。

在半导体光电元件中,当它的接受面吸收一个光子后,便能产生一个可流动的载流子,使半导体的电阻随光照强度而变化,例如光敏电阻;如果接收面经光照后,产生一定的电压,从而引起一定大小的外电流,那么它就是光电池;半导体光电二极管的作用就是在吸收光后产生的电子-空穴对,它们被跨