

激光功率计和能量计的实验研究

邱 明 新

(北京电子所)

提 要

本文介绍激光功率计与能量计的一些实验结果,同时对激光功率计与能量计作了简要的介绍。

一、概 述

激光功率计与能量计是测量激光功率与能量的器件,本文介绍常用的激光功率计与能量计的实验研究结果。激光功率计与能量计的种类繁多^[1~8],对此先作些简要的回顾。

按使用目的分,光接收元件共有三类:本征激光功率计与能量计、光信号检测器和光频变换器。本征光功率计与能量计一般除了测量连续光功率与光脉冲能量外不作其他使用,这是本文的主要内容。光信号检测器主要用来测量被调制在光信号中的信息,常用在光通讯、计算机和程序控制中,一般地说光检测元件可以定标成为光功率计与能量计。光频变换器则是实现光频率变换的手段;将一种频率的光变成另一种频率为灵敏元件能检测的光,以适应于光检测元件。

光频变换器的种类也很多,染料激光器、非线性光学元件、荧光物质以及光量子计数器^[9]等都属于这一范畴。最近,用荧光物质 BBO(2,5-二联苯基噻唑)和水杨酸钠成功地测定了脉冲氦真空紫外激光的脉冲宽度与光能量。前者荧光寿命极短,后者荧光寿命极长。

按物理过程分,光接收元件也可以分成三类:

(1) 光电磁型^[10]:光照射这类元件时,光强变化引起元件上光电流或光电动势的变化。半导体内光电效应的光电导元件、光霍尔效应元件和光伏打元件,以及外光电效应的光电管、光电倍增管和光电行波管等都是这类元件。光电磁元件一般被用作光信号检测器,光电磁元件的响应时间极短,可以检测调制在光频中的微波信号。

光电磁元件的优点是灵敏度极高,可以测量几个光子的微弱光信号,因此通常被用来测量微弱光功率与激光脉冲宽度,激光脉冲宽度配合能量计光脉冲能量的测量从而定出脉冲功率。光电磁元件有明显的波长选择性,作为功率计使用时必须对不同波长逐个校准或采用一展平灵敏度曲线的规一化滤光片;光电磁元件在不同工作温度下灵敏度不同,精确使用时要有恒温装置或低温设备;这类元件的灵敏度是非线性的,作为功率计使用仅用在小信号区域,一般对入射光要加以衰减;再有这类元件的灵敏度与工作历史有关,即光疲乏与元件老化。

(2) 光机械型:光子具有动量,在一小反射镜上产生反冲力,当其反冲力矩 $\frac{2PL}{C}$ 与油丝力矩平衡时,轴上另一反射镜转动了一个角度 θ ,转角 θ 正比于光功率 P 。装置若有较大惯性时,与冲击电流计相似,可以测量光脉冲,量程从 10^{-2} 焦耳至 10^5 焦耳。

(3) 光热型:光热型原理是将全部接收光能转变为热能,使接收体温度升高,用热电偶、热

敏电阻、电阻率、温度计以及其他办法指示温度的变化值，温度的变化值正比于激光功率与激光能量。热吸收体可加工成对波长没有选择性，光热型元件的线性良好，可靠性与重复性好，同时也可采用电加热办法定标，这类器件大多是本征功率计与能量计。

最典型的例子是液体量热计，在一杜瓦瓶中盛有对激光吸收的深色液体，可以测量大能量激光并具有很高的精确度。为了防止巨脉冲激光引起液面的蒸发，通常使液体吸收系数选取适当值。为了防止固体量热计表面物质溅射和氧化，将光从一银空心球的小孔射入，每次反射均吸收一部分光能，银空心球可以测量巨脉冲激光^[11]。

光热型元件也可以制造得很灵敏，接收弱的光信号。如灵敏热电堆和高莱。后者可测至 10^{-10} 至 10^{-5} 瓦，响应时间1秒。当光吸收后腔内气体膨胀推动腔壁上的薄膜形变，用光学办法测量其形变。灵敏热电偶反应时间可至 10^{-8} 秒，热电晶体反应时间可至几十毫秒^[12]，热电晶体堆可以作为光信号检测器。

除了以上物理过程外，某些化学过程如感光、光分解和光聚合等也可用作光功率与能量测量的方法。用照相机测定激光脉冲能量，乳胶感光中心数目与光强有关。不过，感光曲线是非线性的，且要通过显影过程。其他感光材料有光聚物质、热塑物质和光色物质，亦可以指示激光能量。光化学方法误差大，已很少使用。

此外，半定量测量方法很多，例如用6943埃红宝石激光在10厘米透镜的焦点上将刀片打一个洞的能量为1焦耳；吸收系数为30~40%的物质如木头、棉花、纸张在连续激光器作用下烧焦的功率为3~5瓦/厘米²；1.06微米或6943埃在复写纸上打一明显的痕迹的能量为1焦耳/厘米²，经三秒后皮肤感到疼痛时连续激光功率为1瓦/厘米²，在不很白的书写纸上用氩激光照射5秒钟使纸自燃的功率为12瓦/厘米²；10.6微米激光在耐火砖上烧一个暗红的光斑时的功率为20瓦/厘米²。这些半定量的经验总结可供在没有定量测量器件时的一个估计，不会发生数量级的误差。

我们在实验中研制的激光功率计与能量计列于表1。

表1 激光功率计与能量计的特性

型 号	名 称	物理过程	波长(微米)	量 程	校准方法	误 差
F-1	流水功率计	光 热	30~0.3	100~1000 瓦	电校准	5%
TP-101	热电堆功率计	光 热	30~0.3	50 微瓦~20 毫瓦	电校准	5%
TP-201	热电堆功率计	光 热	30~0.3	0.1~20 毫瓦	电校准	2%
W-1	鼠巢能量计	光 热	30~0.3	0.1~10 焦耳	电校准	10%
R-1	刀片能量计	光 热	30~0.3	10~300 焦耳	理论值	15%
G ₁ , G ₂ , G ₃	石墨能量计	光 热	30~0.3	0.5~120 焦耳	光校准	10%
S-1	硅光电池功率计	光 电	0.4~1.1	0.05~100 毫瓦	光校准	10%
TP-102	热电堆功率计	光 热	30~0.3	1~50 瓦	光校准	10%

二、功率计与能量计原理

热效应光功率计与能量计分显示部分和接收部分。显示部分包括测量线路和指示电表，

测量线路可有电桥或直流放大器或差放直流放大器。接收部分包括接收头和扩大一至二数量级量程的衰减器。接收头的外壳通常用黑化的铝壳对光热电屏蔽,外壳前部有一光阑,外壳为一支撑杆支撑调节升降,支杆固定在基座上。接收头内部为接收元件,可分热吸收体、热载体、温度敏感器和自校准器四个部分。有些器件缺自校准器,也有些器件热吸收体本身就是热载体。

热吸收体是保证百分之百地吸收光能并转变成热能的元件,对液体量热计来说,热吸收体

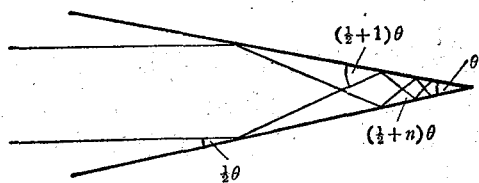


图1 光束在锥体内反射

就是液体本身,固体器件通常在元件表面蒸镀高吸收系数物质。这些物质如黑化金、油烟和黑化的氧化铝膜等。实验表明细颗粒的油烟对可见光的吸收系数可达99%,并对红外、可见光与近紫外的吸收系数基本上相同,它的缺点是易脱落。

黑化金机械性能良好,从0.3微米至12微米的反

射率不大于1.2%。经过黑化的氧化铝膜吸收系数可达90%以上,但还需要几何吸收配合。炭斗锥体与刀片狭缝称几何吸收体,其锥角或刀片夹角为 θ ,如图1所示。

平行于锥轴入射的光若第 $n-1$ 次反射改变角度为 $\frac{2n-1}{2} < \frac{\pi}{2}$,而第 n 次反射角 $\frac{2n+1}{2} < \frac{\pi}{2}$ 时,则第 n 次反射后光线反向传播。锥角 θ 减小则反射次数 n 将随之增加,这时接收体愈细长,接收体中温度愈难热平衡。有人建议选择60度锥角,这时锥的深度与口径相等。但当炭斗上的热电偶对数较多时可用较小角度,石墨的反射率为30%以下,经四次反射才能达到99%以上的吸收率,故选用22°角。流水功率计的热能迅速传给流动的水,故也可选取较小角度,接收头用紫铜加工成锥角为22°,壁厚为1毫米,内壁涂以黑色物质,其吸收系数也可达到99%。

热载体吸收光能后温度升高,同时有一部分能量经传导流失,可用热平衡方程表达:

$$mC \frac{d(T-T_0)}{dt} + g(T-T_0) = \frac{1}{4.2} P \quad (1)$$

式中 P 光功率(瓦); m 为热载体质量(克); C 为热载体比热(卡/克·度); T 为热载体接收光后的温度; T_0 为热载体没有接收光时的温度,即外界温度; g 为热交换率(卡/度·秒); t 为时间(秒)。

(1)式右边为吸收的光能,左边第一项为接收体的温度升高,左边第二项为热传导的能量损失。热传导率正比于支撑的均匀圆杆截面和热导率,反比于圆杆的长度:

$$g = \frac{SK}{l} \quad (2)$$

式中 S 为导体的截面积(厘米²); l 为圆杆长度(厘米); K 为圆杆的热导率[卡/(厘米·秒·度)]。

如果有 n 个支杆则 S 为其总截面,(1)式左边第二项对任意形状的导体仍然成立。对圆盘状吸收体如图2所示,有热传导方程:^[13]

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{P}{S_1 K} = 0 \quad (3)$$

式中 r 为从圆盘中心计算的径向座标(厘米); S_1 为

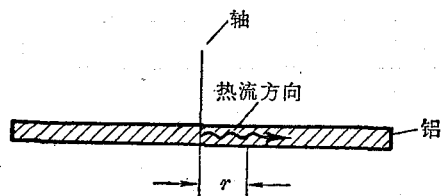


图2 光能在圆盘导体中的热传导

圆盘面积(厘米²)。

经适当计算后从(3)式求得热交换率为:

$$g = \frac{4\pi R^2 K}{R^2 - r^2} \quad (4)$$

(4)式中 g 是 r 的函数,这是由于各处温度不等。若热电偶放在圆盘中心,热交换率为 $4\pi K$;若热电堆分布在 R' 的圆周上,则热交换率为 $\frac{4\pi K R^2}{R^2 - R'^2}$ 。

对于流水功率计,热交换率为:

$$g = FC\rho \quad (5)$$

式中 F 为液体的流速(厘米³/秒); C 为液体的比热; ρ 为液体的密度。

热载体在外加光能停止后,温度以指数形式衰减,由(1)式求得热载体衰减时间 τ 为:

$$\tau = \frac{mC}{g} \quad (6)$$

当热交换率很小、热容量很大时,温度衰减时间很长,则(1)式左边第二项可以忽略。这时,将(1)式写成差分形式,热载体经脉冲光能 $P\Delta t$ 作用后升至最高温度 T_m :

$$T_m - T_0 = \frac{P\Delta t}{mC} \quad (7)$$

设热载体温度梯度衰减时间为 τ' , 当热载体温度升到最高值时,热载体温度基本上均匀。这一要求用数学式表达如下:

$$\tau' \ll \tau \quad \Delta t \ll \tau \quad (8)$$

另外一个极端即功率计情形,温度衰减时间 τ 很短,(1)式左边第一项可以忽略,在光功率连续作用下,达到热平衡时热载体温度从(1)式解得为:

$$T - T_0 = \frac{P}{g} \quad (9)$$

功率计情形要求 τ' 和 τ 都很短,且同一数量级:

$$\tau' \approx \tau \quad (10)$$

测量热载体温度用热电偶等温度敏感元件,用多个温度敏感元件指示热载体的平均温度。设有 n 个热电偶均匀地分布,每个热电偶指示其邻近热载体质量 m_i 的温度 T_i , 则热载体的平均温度为:

$$\bar{T} = \frac{\sum_n T_i m_i}{\sum_n m_i} \quad (11)$$

这样,功率计与能量计要求测量的温差 $T - T_0$ 和 $T_m - T_0$, 经 n 个热电偶就得到了平均温差 $\bar{T} - T_0$ 和 $\bar{T}_m - T_0$ 。TP-101 型热电堆功率计中使用了四十余对热电偶,它的结构如图3所示。

热辐射与温度的关系是非线性的,为了消除热辐射,故一般要求功率计与能量计的温升 $\bar{T} - T_0$ 和 $\bar{T}_m - T_0$ 愈小时愈好。温升一般要求在零点几度至几度以内,表2给出石墨能量计温升值,功率计还要求小一些。功率计 TP-101 是靠云母片热传导热量,仅适用于小功率激光器。在大功率情形

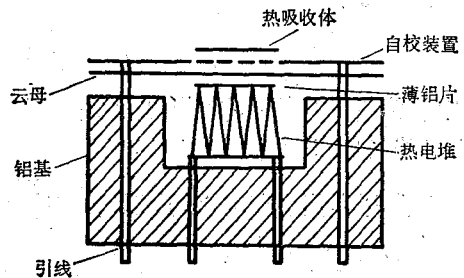


图3 TP-101型热电堆功率计结构

常可用铝基代替云母片,在铝基上产生20微米厚的氧化铝膜,可以保证热电偶与铝基接触而不致短路。图4表示TP-102的结构,其热吸收体为车床加工的同心V形槽,并经氧化染黑。

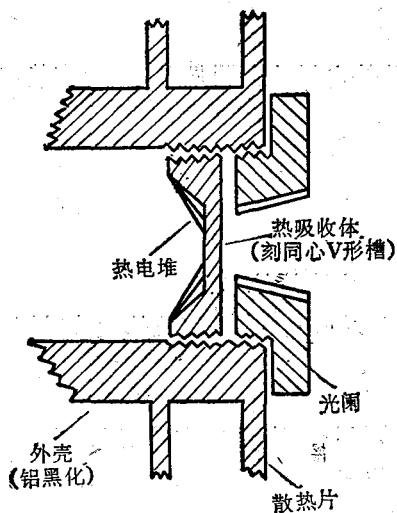


图4 TP-102型热电堆功率计结构

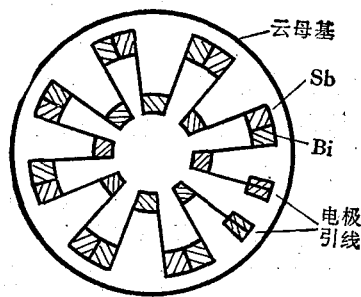


图5 TP-201热电堆结构

为了减少热惯性和增加热接触,近年来大多采用蒸镀热电堆代替金属丝热电堆。图5为TP-201型热电堆的结构。蒸镀材料是Sb—Bi或Au—Bi,要求用加厚法降低热电偶内阻。国外产品采用33对以上,有的还加工成长城形状用在水冷功率计,这时水冷仅起冷却作用,只要流量足够与流速波动无关。水冷功率计可使用至1千瓦。

表2给出石墨能量计热电偶对数及其他参量。

表2 炭斗能量计参量

型号	质量(克)	热电偶对数	量程	最大温升	炭斗口径(厘米)
G-1	2.54	7	1~10焦耳	6度	1.5
G-2	5.45	11	4~25焦耳	6.8度	1.9
G-3	27.7	26	1~120焦耳	6度	2.5

鼠巢能量计为一团疏松地塞入开口为 $\phi 12$ 的小杜瓦瓶内的漆包线,漆包线共7.9克、直径0.06毫米,电阻为1.9千欧,占据杜瓦瓶全部容积,杜瓦瓶内球直径为4厘米。这时漆包线团透光度小于2%,激光在漆包线团中多次散射吸收使其温度升高,温度变化值可用电阻变化值 $R_m - R_0$ 表达:

$$T_m - T_0 = \frac{R_m - R_0}{\rho \alpha} \cdot \frac{S}{l} \quad (12)$$

式中 ρ 为铜的电阻率(欧姆·厘米); α 为铜的电阻温度系数(度 $^{-1}$); S 为导线截面积(厘米 2); l 为导线长度(厘米)。

1焦耳光能引起0.38度温升, $\frac{\Delta R}{R} \sim 1.4 \times 10^{-3}$ 。10焦耳以上的能量容易引起漆皮的破坏,故不宜使用。

刀片功率计与流水功率计中均用热敏电阻测量温度变化,为了使惠斯顿电桥中流过热敏

电阻或漆包线的电流不导致温升的误差,其阻值均选取 2 千欧左右。当 $\frac{\Delta R}{R}$ 在 10^{-2} 以下时,惠斯顿电桥指示电流与 $\frac{\Delta R}{R}$ 是线性的,

$$I = \frac{\varepsilon}{2R+r} \frac{\Delta R}{R_0} \quad (13)$$

式中 I 为指示电流值(安培); ε 为电桥的电池电动势(伏特); r 为电池内阻(欧姆); R_0 为热敏电阻或漆包线阻值(欧姆); ΔR 为热敏电阻或漆包线阻值变化值(欧姆)。

三、定标与讨论

功率计与能量计可用电的方法或光的方法定标。电定标是通过自校准器上产生欧姆热标定,光定标法是用标准灯或已定标的稳定激光器定标待标定的功率计和能量计。

图 6 是 TP-101 和 TP-201 的校准膜,阻值在 200 欧姆左右,电极用加厚法消除阻值,加热时用五位电位差计测定其上所加的电压。图 7 为 TP-101 的校准灵敏度曲线。加上测量时吸收系数的误差,总误差小于 5%。

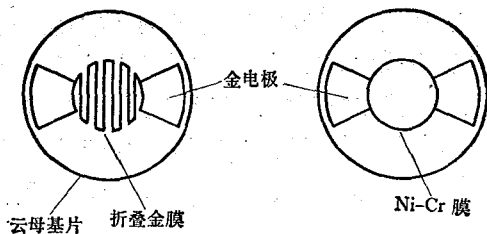


图 6 热电堆功率计的校准膜

左: 折叠的金膜式镍膜; 右: 均匀的镍铬膜

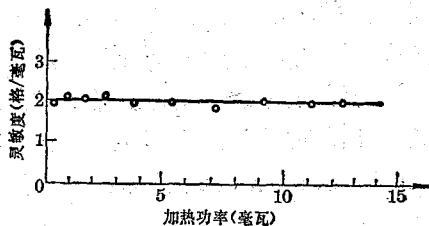


图 7 TP-101 功率计校准结果

F-1 流水功率计用 600 瓦电炉丝截取 1/6 段作校准器,校准器与激光发热区相近。热量不断被流水带走,因此入口处的水温与出口处的水温存在温度差 $T-T_0$ 。这时并不要求 $T-T_0$ 很小的条件, $T-T_0$ 可达 30 度。液体流速用虹吸法调节两个液面差,图 8 是流水功率计校准曲线,从 72 瓦至 1500 瓦左右灵敏度波动小于 3%。

$$T-T_0 = \frac{P}{4.2F} \quad (14)$$

鼠巢能量计的校准可用电的办法或光的办法,电的办法是用电容放电法或通 Δt 时刻的直流电流 I 。电容器放能为 $\frac{1}{2} CV^2$; 通直流电消耗能量为 $I^2 \cdot R \cdot \Delta t$ 。由于大容量电容一般是非标准的,且放电时间常数很长,故不如后者准确。刀片能量计的定标方法是先在水槽上测定电桥的电流指示的温度,再根据刀片的热容量计算出激光能量,可测 10 至 300 焦耳,其缺点是刀口容易生锈。

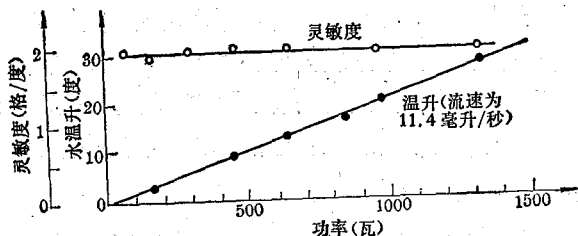


图 8 F-1 流水功率计的校准曲线

炭斗能量计、硅光电池功率计及 TP-102 热电堆功率计都采用光定标法。光

源可以是标准灯、脉冲氙灯或功率稳定的激光器。图9表示用同一光源不同曝光时间下测定炭斗的灵敏度,有很好的线性关系,偏离不大于3%。

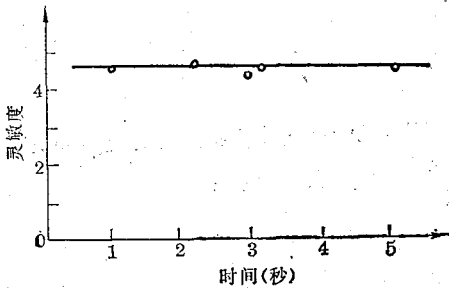


图9 G-1 炭斗能量计在不同输入能量下的灵敏度(激光功率为1.5瓦)

校准与测量中常用到衰减器,在可见光可用中性衰减片、金属网格或氧化镁及硫酸钡涂制反射球。有人怀疑中性衰减片的线性,在我们实验中并没有明显地表现出来。热效应的功率计可用转盘衰减器,转盘有一 θ 角的开口,以100周/秒至200周/秒的转速转动,其衰减率为 $\theta/2\pi$ 倍,可使量程扩大1个数量级以上。

硅光电池可测量至100毫瓦/厘米²,经衰减器扩大量程后也可以使用在瓦级以上的0.4至1.1微米的

激光功率测量中^[3]。硅光电池灵敏度峰值在0.8至0.9微米之间并随温度有一些变化,硅光电池灵敏度的波长选择性可用一规一化滤光片展平,单频或二波长很近的激光使用时可以不必使用滤光片。硅光电池的灵敏度随波长变化如图11所示。硅光电池使用时可用其开路光电动势短路光电流。从图10看出其短路光电流线性更好一些,使用时将硅光电池与小阻值电阻并联,从并联电阻上引出信号至直流放大器。接近于短路的光电流测量只要校准曲线是线性的也可以使用,例如接入5毫安量程的毫安表,电表内阻为20欧姆,经35倍衰减后测量瓦级氩激光器的功率线性良好。在线性区域内光点大小与光电流无关,对于聚焦的光斑若强度进入响应曲线的饱和区后,不再适用。硅光电池频率响应很高,可达1兆周。由于响应时间短,使用方便,在实验室中用来测量激光参量,全息照相物光束与参考光束强度比、光学元件透明度和反射率等。

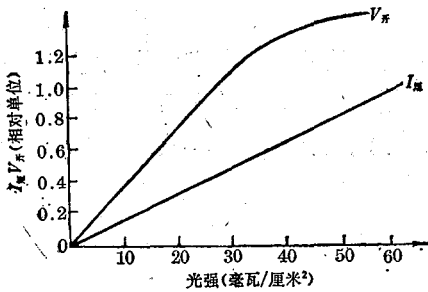


图10 硅光电池的短路电流、开路电压与光强的关系

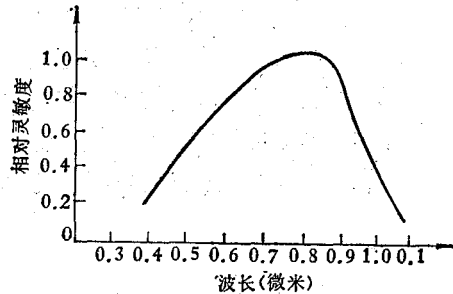


图11 硅光电池的灵敏度与波长关系

最初的能量计如炭斗、鼠巢和刀片能量计等具有良好的对称性,即双体型。一个作为热载体,一个作冷参考体或称为补偿器。我们发现用一热传导良好的金属环作为冷参考体时,效果比双体型良好,金属环可保证处于周围空气温度 T_0 。金属环与石墨锥体同心,热容量远大于石墨锥体。鼠巢能量计则用一电阻箱代替漆包线作为桥式电路的一臂,可调节到与热载体中的漆包线阻值相同。

从(7)和(9)式激光能量 $P\Delta t$ 和功率 P 测量的相对误差 $\frac{\Delta(P\Delta t)}{P\Delta t}$ 和 $\frac{\Delta P}{P}$ 应正比于温度

测量的相对误差 $\frac{\Delta(T-T_0)}{T-T_0}$ 。因此热效应功率计和能量计测量误差,除了能量计时间控制误差外归结为温度测量的误差。温度测量误差由下面几项引起:吸收光不是百分之百;测量线路失真和电表漂移;外界温度涨落;校准时光源或加热电源波动;衰减器或窗口带来的误差等。

TP-201 热电堆功率计结构如图 12 所示,其热容量很小,响应时间可短至 2~3 秒。其他功率计响应时间均在数秒以上,一个缩短测量时间的办法是在测量线路中加上阻容补偿线路,可使指示功率的时间大大缩短^[14]。

在连续激光器中测量功率有一种方法是用能量计加快门使连续激光产生 $P\Delta t$ 的脉冲能量, Δt 是快门开放时间。这种方法的缺点在于不能瞬时反映功率变化并增加了时间控制的麻烦和误差。TP-102 热电堆功率计初步介决了高功率中红外频率的连续测量问题。

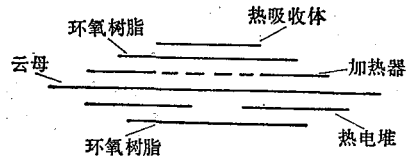


图 12 TP-201 热电堆功率计结构

功率计及能量计的种类繁多,热效应的功率计稳定性良好,误差 5% 至 10%,在激光功率与能量测量中已满足需要。计量单位用来定标的量热计误差可以小到 1% 以下。至于有特殊用途的功率计与能量计种类很多,不宜赘述。当然,随着激光事业的发展激光能量和功率的计量标准的建立是非常需要的。

参 考 资 料

- [1] D. E. Killiek et al., *Infrared Physics*, **6**, No. 2 (1966), 85~98.
- [2] J. A. Ackerman, *Applied Optics*, **3** (1964), 644~645.
- [3] P. G. Witherell et al., *Applied Optics*, **8** (1969), 813~815.
- [4] R. W. Zimmerer, *Laser Focus*, **6**, No. 9 (1970), 39~43.
- [5] Р.А. Валитов и др., *Измерительная техника*, No. 5 (1965), 37~41.
- [6] U. S. Patent, 3, 398, 281.
- [7] D. A. Mosparron et al., *Nat. Bur. Standard Tech. Note*, 418 (1967).
- [8] D. A. Jennings et al., *Nat. Bur. Standard Tech. Note*, 382 (1969).
- [9] W. F. Krupke, *IEEE J. Quant. Elec.*, **1**, No. 1 (1965), 21~23.
- [10] P. W. Kruse et al., 红外技术基础(中译本), 1965, p. 206~213, 381~412.
- [11] K. Büche et al., *Zeitschrift Für Angewante Phys.*, **32**, No.5~6 (1972), 359.
- [12] 山香英三, 电子材料(日), **9**, No. 1 (1970), 155~160.
- [13] R. Gardon, *Rev. Sci. Inst.*, **24**, No. 5 (1953), 366~370.
- [14] U. S. Patent, 3, 596, 514.

JSH-1 型激光水平仪

陕西省西安市莲湖区测绘仪器厂激光仪器试制组的工人同志在党的“十大”精神鼓舞下,以蚂蚁啃骨头的革命精神,群策群力,狠批林彪鼓吹的“天才论”,自力更生,艰苦奋斗,经过日夜奋战,反复试验了二百余次,终于在 1973 年 9 月试制成功了激光水平仪。经实测鉴定,仪器符合设计要求,基本达到预期效果。JSH-1 型激光水平仪用波长为 6328 埃的氦-氖激光器作光源,白天的测量距离为 50 米以上,晚上为 400 米以上。

该仪器具有水平准直和定向、导向等性能,主要用于大型机械安装,建筑工程、矿井和隧道导向及测量等方面。其优点是:准确可靠,减少人为视差和指挥误差,提高工作效率,降低劳动强度,节省人力和时间,便于地下和夜间操作。