

这样就可求出第一次测量的光强下的消光值  $I_{s0min}$ :

$$I_{s0min} = \frac{I_{c0} I_{smin}}{I'_{c0}}$$

代入(3)式得:

$$\frac{I_{s0min}}{I_{s0}} = \cos^2 \alpha \cos^2 \beta$$

即消光比

$$R = \frac{1}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \quad (4)$$

我们实验中使用的是清华大学生生产的单模稳频氦-氖激光管(作普通激光管用),经实验证明,激光输出在很大范围内变化时(考虑激发电流), $k$ 都能保持不变。实际使用时激光强度的波动不是很大的,所以 $k$ 认为是常数还是合理的。

这个方法由于不需校准光电池的输出与光强之间的关系,同时检流计仅作指零用,所以也不需考虑其指示的线性,因而对提高测量精度也是有利的。

另外,如果采用硅光电池作为光接收元件(在我们的仪器中是采用对称的硅光电池2CR61),则宜选取其短路电流来指示光强。这是因为测量消光比的光斑总是有一定大小的。测量结果应该是这个光照截面内的平均值。如果选取开路电压作指示的话,则由于开路电压仅与光强有关(近似指数关系),而

与光照面积无关,所以不能反映这个平均情况。而短路电流是既与光强有关,又与光照面积有关的,所以它能实现这个要求。该仪器里,由于两个硅光电池是互相串联的(其等效线路示于图2),所以在光照平衡时,都是处于理想的短路状态(此时  $V_{AB}=0$ )。

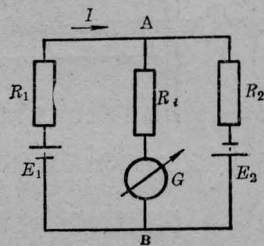


图 2

$R$ —在一定光照情况下硅光电池的内阻  
 $R_i$ —检流计内阻

设硅光电池完全对称,则  $R_1=R_2=R(I)$ ,光强的微小变化,流过检流计的电流为:

$$i = \frac{\Delta E(I)}{2R_i + R(I)}$$

可见采用低阻检流计可以提高灵敏度。

这种方法由于是在光路上进行补偿,而激光管的光输出强度,特别是频率仍然是变化的,所以,对于需要激光频率稳定的测量来说,如双折射率梯度的测量等,与没有进行补偿的效果是一样的。

## 激光大功率计量标准的研制

中国计量科学研究院光学室

激光技术的发展,特别是连续激光输出功率的日益增大,从几十瓦到上千瓦的各种连续激光器,广泛应用在工业、农业、医疗、军事和科学研究,因此,建立测试大功率标准,统一全国量值已成为急待解决的问题。

流水式功率计测量范围大,承受功率高,

重复性和稳定性好,线性范围广,准确度也较高,因此国内外广泛用来测试大功率连续激光。

### 一、原理和装置

流水功率计的原理示意图如图1所示。

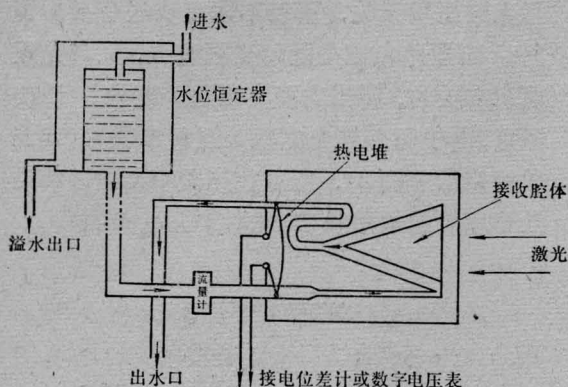


图1 流水功率计示意图

“水位恒定器”使流经流量计和接收器双层锥体的流量保持恒定。它是一个双筒水箱，进水灌满内筒后，水从内筒面溢出，经外筒的溢水口流走，以使内筒液面保持恒定高度。这样再把功率计出水口高度固定后，就能保持流量恒定，流量大小可用流量计读出，也可用高精度的秒表和量筒来测得。激光被涂黑锥体壁吸收后，使流经接收器锥体以后的水温升高，从而流经接收器锥体前后的水温有一温差。这一温差可由热电堆测得，通过电位差计或数字电压表指示。

知道温差和所对应的流量后，入射的激光功率就可由下式得出：

$$P = JCQ\Delta T = JCQ \frac{\Delta E}{(dE/dT)} \quad (1)$$

式中： $J$ 为热功当量(4.18焦耳/卡)； $C$ 为水的比热(卡/克·度)； $Q$ 为流量(克/秒)； $\Delta T$ 为温升(度)； $\Delta E$ 为电位差计或数字电压表指示的热电势值； $dE/dT$ 为热电堆的热电势率。

显然，对于水，常数 $C$ 近似可取1， $dE/dT$ 是预先经过精确标定过的热电堆材料的热电势率，对某一确定的热电堆材料，在一定精度和使用范围内也是一个常数。因此确定流量 $Q$ 以后，只要测出热电堆输出的热电势值 $\Delta E$ 以后，就可代入(1)式得到所对应的功率值 $P$ 。

流水功率计由下列各部分组成：

### (1) 接收器

其结构和尺寸如图2所示。

接收锥体的腔长比是7:1；半顶角 $\theta = 8.1^\circ$ ；锥腔内壁涂有高吸收率材料，对它的要求是：①有尽可能高的吸收率，②无光谱选择性，③能耐高温，④具有高绝缘性，⑤有尽可能低的热阻。当然要同时满足这些条件是很困难的。我们采用的是用炭粉拌耐温树脂涂于内壁，内外层锥体都用纯铜，它是通过电解槽电铸加工而成，故均匀无缝，内锥较薄，约0.3毫米，外锥略厚些，约0.6毫米。

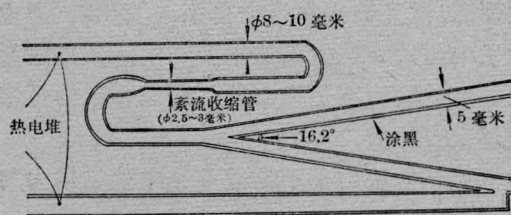


图2 接收器结构和尺寸图

### (2) 敏感元件

图2中进出口水温差由热电堆测出，对它的要求是：

- ① 灵敏度尽可能高，
- ② 具有长期的稳定性。

我们采用 $\phi 0.15$ 毫米的镍铬-康铜热电偶20对串联而成，经过两年多时间考察，灵敏度一直未变，故稳定性较好。

热电偶的热电势 $E$ 和温差 $\Delta T$ 可以用下列近似的经验公式来表示：

$$E = a\Delta T + \frac{1}{2} b\Delta T^2 \quad (a, b \text{ 为常数}) \quad (2)$$

$$\text{则} \quad \frac{\Delta E}{\Delta T} = a + b\Delta T \quad (3)$$

可见 $\frac{\Delta E}{\Delta T}$ 和 $\Delta T$ 成线性关系。通过标定一系列(约10组~13组) $\frac{\Delta E}{\Delta T}$ 和 $\Delta T$ 的对应关系，用最小二乘法原理处理，可以确定常数 $a$ 和 $b$ 。我们的这一标定是通过基准电阻温度计来完成的，最后计算所得的 $a = 44.636$ ， $b = 0.0336$ ，所以



$$\frac{\Delta E}{\Delta T} = 44.636 + 0.0336 \Delta T \text{ (微伏/}^\circ\text{C)}.$$

可见如果  $\Delta T$  很小, 则  $\frac{\Delta E}{\Delta T} \approx$  常数, 调节流量, 使温升  $\Delta T$  保持在  $1^\circ\text{C}$  左右, 则取  $\frac{\Delta E}{\Delta T} = 44.67$  微伏/ $^\circ\text{C}$  造成的非线性误差  $< 0.1\%$ 。

### (3) 流量计

可选用涡轮式或浮子式流量计。我们采用的是4毫米涡轮流量计, 流量范围在  $9 \sim 55$  厘米<sup>3</sup>/秒之间, 精度为  $0.5\%$ , 它可以同时指示瞬时流量和积分流量。如配以高精度的秒表和量筒, 则可随时校对或直接测量流量。

### (4) 进水管

测量时, 要求使水吸收的热量能很快地均匀混合, 并在热偶测温时, 整个管截面的水温处处相等。这样不但能使每次测量有很好的重复性, 而且用公式  $P = JCQ\Delta T$  计算时,  $\Delta T$  能代表水的平均温升。为此要求管内水的流动呈紊流状态, 流体才均匀相混, 各点温度处处相同。根据流体力学原理, 只有在雷诺数超过  $6000 \sim 10000$  后, 管中流体才呈旺盛紊流。而雷诺数  $R_N$  是:

$$R_N = \frac{2rV}{\nu} \quad (4)$$

式中  $R_N$  为雷诺数;  $r$  是管半径;  $V$  是管中流体的流速;  $\nu$  为流体运动粘滞系数(对于室温时的水, 其值约为  $0.01$  厘米<sup>2</sup>/秒)。

在设计确定管半径  $r$  时, 还必须根据热电堆灵敏度、指示器灵敏度和测量下限来确定合适的流量。而流量

$$Q = \pi r^2 V \quad (5)$$

根据(4)和(5)式, 按所需的流量  $Q$  和雷诺数  $R_N$ , 可以确定管的半径  $r$ 。但这一段管径只是用来使水达到紊流, 故不必太长, 按流体力学原理, 其长  $L$  约为管径的  $20 \sim 40$  倍即可。经计算, 我们选用了长约  $60 \sim 80$  毫米,  $r$  约  $2.5 \sim 3$  毫米的管子作为紊流收缩管(见图2), 太短了来不及充分紊流, 太长了压

力损失太大, 达到所需的流量要有较高的水位差, 很不方便, 其余流水管径约  $8 \sim 10$  毫米。

## 二、用电加热验证

### (1) 式结果的准确性

显然, (1)式所得的功率值是鉴于对流量值  $Q$  和温升指示  $\Delta E$  以及使用标定常数  $\frac{dE}{dT}$  值进行计算的结果, 这一结果的可靠性可以通过与电加热校准方法进行比对而得到验证。这一工作可分两步进行。

(1) 把加热丝绕在接收腔的通水面进行电加热(图3所示), 这时加热所消耗的电功率按下式分配:

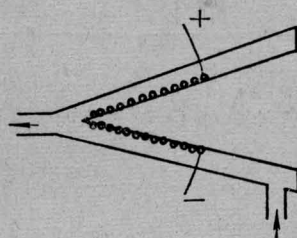


图 3

$$P_{\text{电}} = P_{\text{水}} + P_{\text{引线}} + P_{\text{壁}} \quad (6)$$

式中,  $P_{\text{水}}$  是被流水带走的功率;  $P_{\text{壁}}$  是水升温后沿管壁散失的功率, 控制适当流量和温升, 可使这项损失  $< 0.1\%$  (见后面误差分析一节), 因而可忽略;  $P_{\text{引线}}$  是通过加热丝引线散失掉的功率, 实验和理论都能证明, 当引线直径小于  $0.25$  毫米时, 这一散失的功率将小于  $0.1\%$ , 因而亦可忽略。故此时, (6)式将变成:

$$P_{\text{电}} \approx P_{\text{水}} \quad (7)$$

也就是说, 所加的电功率将没有其他损耗, 全部被水带走。此时, 如果(1)式中的常数  $\frac{dE}{dT}$  以及所测得的流量值  $Q$ , 和热电堆指示值  $\Delta E$  均可靠的话, 电功率  $P_{\text{电}}$  应用(1)式算出来的所对应的被流水带走的功率  $P_{\text{水}}$

相同。所以这一方法综合考核了(1)式诸量值用来计算功率值的可靠性。

实验是在不同流量下,用不同的电加热功率反复多次进行,把每次电加热功率  $P_{电} = I \times V$  值和用(1)式计算所得的对应的  $P_{水}$  值进行比较,发现(7)式基本成立。几轮实验结果见表1。

表 1

次 序	$(P_{电} - P_{水}) / \bar{P}$ (平均值)
1	-0.1%
2	-0.4%
3	-0.5%
4	-0.2%
5	+0.2%
6	+0.1%
7	+0.5%
平 均	-0.1%

实验证明:此时  $P_{电} \approx P_{水}$ 。亦即用我们的方法测得的流量  $Q$  和  $\Delta E$  以及利用的标定常数  $\frac{dE}{dT}$  在代入公式(1)进行计算时,不可靠性  $< \pm 0.5\%$ 。

(2) 在激光照射时用(1)式算出的功率  $P_{水}$  值必然低于实际的激光功率  $P_{激光}$ 。因为此时:

$$P_{激光} = P_{水} + P_{反射} + P_{背} \quad (8)$$

这里,  $P_{水}$  仍是(1)式算出的被流水带走的功率;  $P_{反射}$  是锥体反射损失;  $P_{背}$  是通过对流、传导和辐射从锥腔背后失掉的功率。这里  $P_{反射}$  可以根据锥度和锥壁涂料吸收率来估计,  $P_{背}$  一项可以用外插入的电加热锥体模拟激光照射时的光锥体情况来确定修正。我们采用的电加热锥体是电铸成的中空纯铜锥,与接收腔同锥度,外绕 0.15~0.3 毫米的加热丝,锥底分  $\phi=10$  毫米和  $\phi=18$  毫米两种,以模拟不同大小的激光光斑。加热丝直径 0.25 毫米,故  $P_{引线}$  可以忽略。用这样的锥体塞入接收腔(如图4)进行电加热时,所消耗的电功率  $P_{电}$  按下式分配:

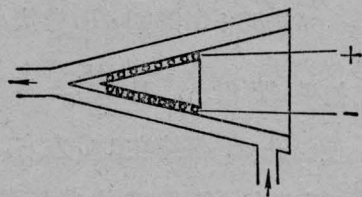


图 4

$$P_{电} = P_{水} + P_{引线} + P'_{背} \quad (9)$$

忽略  $P_{引线}$  后,即得:

$$P_{电} = P_{水} + P'_{背} \quad (10)$$

(10)式中的  $P'_{背}$  是加热锥加热后因对流、传导和辐射从背后耗散的功率(实际上也包括流水温升后,在流到热电堆热端前,沿管壁散失的功率,经计算  $< 0.1\%$ )。用实验确定  $P'_{背}$  后,我们就用  $P'_{背}$  来代替(8)式中激光照射时的  $P_{背}$ ,以对激光照射时这一损失进行修正。由(10)可知:电加热功率  $P_{电}$  和所对应的用(1)式求得的  $P_{水}$  值之差就是  $P'_{背}$ 。实验表明这一修正值对不同  $\phi$  的加热锥约为 0.6~1.1%。

### 三、与作为小功率计量标准的比对情况

#### 1. 与空腔型绝对辐射计比对

目前,我国已确定用空腔型绝对辐射计作为小功率激光计量标准,将流水功率计与它比对,以求将大功率的量值统一在绝对辐射计的值上。几次比对结果如表2。

表 2

流水功率计 编 号	$(P_{流水功率计} - P_{绝对辐射计}) / P_{绝对辐射计}$		
	75 年下半年	76 年上半年	76 年下半年
0	-0.8%	+2.3%	-1.5%
2			-1.3%
3		+0.7%	-2.0%
4		-0.1%	-1.2%
5		-0.2%	-1.2%
6		+0.7%	-2.6%
平 均	-0.8%	+0.7%	-1.6%



因用中功率计过渡进行比对, 加上光源有些波动, 故结果有一定发散性。实验表明我们的流水功率计与空腔型绝对辐射计的量值可符合在  $\pm 2\%$  左右。

## 2. 与圆盘式临时中功率标准比对

上海标准计量管理局保存的圆盘式中功率计是我国中功率临时标准。流水功率计与之进行了比对。实验结果是流水功率计测得值偏高  $1.6\%$ 。

## 四、误差分析

本功率计的不可靠性主要可从两方面来考虑: 1. 测量公式(1)中诸量时所引进的误差; 2. (1)式所得的值与实际激光值的偏差。

分别考虑如下:

(i) 常数  $J$  和  $C$  是精确物理常数, 在我们所要求的精度内, 可认为不带来误差, 而且必要时, 可按温度和其它条件作微小修正。

(ii) 流量  $Q$  的测量用精度高的秒表和量筒, 其误差可控制在  $\pm 0.3\%$ 。热电堆输出电势受流量、环境温度和本身结构工艺等的因素影响, 有一定起伏, 因此它的测量可能引进  $< \pm 0.7\%$  的误差。这两项主要是测量的偶然误差。

(iii) 热电堆的热电势率  $\frac{dE}{dT}$  由基准电阻温度计进行标定, 不可靠性  $< \pm 0.5\%$ 。由三节实验可知: 将标定所得的  $\frac{dE}{dT}$  值和实验测得的  $Q$  值及热电势值  $\Delta E$  代入 (1) 式进行综合考察结果, 也表明这一不可靠性 (即  $< \pm 0.5\%$ ) 的结论是正确的。(用 (1) 式对  $Q \cdot \Delta E$  和  $\frac{dE}{dT}$  三量综合考核结果仍佳于  $\pm 0.5\%$  是因为  $Q$  和  $\Delta E$  的测量误差属偶然误差, 通过多次测量可予以消除。)

由三节知道, 将  $\Delta E$ 、 $Q$  和  $\frac{dE}{dT}$  代入 (1) 式所得的功率  $P$  只是纯被流水带走的功率,

此外另有一些功率分别通过不同渠道散失掉了, 其中:

### (iv) 反射损失

对于我们  $8.1^\circ$  的半顶角的高吸收率腔体, 平行光可作 12 次镜反射, 故镜反射接近于 0。漫反射损失与半顶角大小、平行光束直径与锥腔开口直径之比以及锥壁涂料样品的漫反射率等因素有关。我们涂料的平面样品漫反射率经测定  $< 5\%$ 。做成锥体后, 如按服从朗伯漫射定律情况计算估计, 我们的锥体对不同直径的光斑的漫反射  $< 0.2 \sim 0.4\%$ 。

### (v) 腔顶尖辐射损失

对高斯分布的激光, 腔顶能量集中, 而且锥腔顶的黑涂料容易堆积, 因而热阻也较其它地方大, 致使腔顶尖温升较高, 会发生辐射。这一部分的辐射值近似可用公式

$$P = \sigma T^4 S \frac{R^2}{H^2}$$

来估计, 式中  $R$  是锥腔开口半径,  $H$  是锥腔开口到辐射面的平均距离,  $S$  是辐射面积的轴向投影。计算得这一损失  $< 0.1\%$ 。

(vi) 被水带走的功率, 在到达热电堆热端前, 沿管壁将散失一部分, 这一值可用下式来估计

$$P_{\text{散}} = \alpha S \Delta T$$

这里  $S$  是管壁面积,  $\Delta T$  为水的温升,  $\alpha$  为管壁放热系数 (可查表)。经计算, 这一误差  $< 0.1\%$ 。

(vii) 接收腔壁被光照后发热, 通过传导、对流和辐射向外散失的功率按三节所述实验可作一定修正, 修正后估计仍可能有  $\pm 0.3\%$  的误差。

总括起来, 反射、辐射、对流、传导和沿管壁损失为单向损耗误差, 进行适当修正以后, 估计总共仍可带来  $\pm 0.5\%$  的误差, 加上流量  $Q$  和热电堆输出电势  $\Delta E$  的测量误差以及  $\frac{dE}{dT}$  值的标定误差后, 则我们功率计的标准误差  $\sigma$  为:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{P} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left[\frac{\Delta\left(\frac{dE}{dT}\right)}{\left(\frac{dE}{dT}\right)}\right]^2 + \left(\frac{\Delta P_{\text{修正}}}{P_{\text{修正}}}\right)^2}$$

$$= \pm \sqrt{(0.3\%)^2 + (0.7\%)^2 + (0.5\%)^2 + (0.5\%)^2} \approx \pm 1\%$$

取极限误差  $\Delta = 3\sigma$

则  $\Delta = \pm 3\%$

也就是说我们的流水功率计的不可靠性

在  $\pm 3\%$  以内。我们用它与标准绝对辐射计的数次比对以及与标准中功率计的比对也都符合在这一范围,因而也证实了这一结论。

## 金属膜滤光片反射相移的自动补偿

尹 树 百

### 提 要

本文研究了制备滤光片的简捷控制方法——直接法的应用范围,指出它不仅适用于介质膜系,也适用于吸收膜(金属膜)系。从实验上已证实<sup>[1]</sup>,用此法控制膜厚,可使金属膜与介质膜之间的界面反射相移自行补偿,从而提高了滤光片的主峰波长定位精度。

### 一、引 言

窄带干涉滤光片的镀制,是光学薄膜技术中较困难的课题。其中心问题是透射主峰波长的精确定位,即要求所镀滤光片的最大透射率(主峰)准确地重复出现在预期波长处。因此,必须精确控制膜层的光学常数( $n$ )及其厚度( $t$ )。为了提高每层膜的控制精度,曾提出了光电极值法、波长扫描法、双色法、分光曲线比较法、晶体频移法等等。直接控制法则是对滤光片本身直接进行膜厚控制(不用间测监控片),此时相邻各层膜的厚度必然相关,其厚度误差能相互自行补偿。对于全介质膜系而言,采用直接法,即使每层膜厚度用控制精度不太高的极值法进行控制,亦能得到主峰定位精度很高的滤光片。这一

点已为许多作者<sup>[7,8]</sup>从理论与实验上加以证实。

然而,对于介质膜系适用的直接控制法能否推广用来控制金属膜(有强吸收)滤光片?在制备紫外金属膜滤光片时,我们作了尝试<sup>[1]</sup>,取得了预期的效果,此方法不但简便易行,而且提高了主峰波长的定位精度。

对于金属膜滤光片的制造,通用的方法<sup>[2~5]</sup>是每层膜均单独用一块新的监控片进行厚度控制(间接法)。这样给制造上带来很多麻烦,不但要有间测片的换片机构,而且由于金属膜与间隔层分界面的反射相移(与全介质膜系不同),既不为零,也不为  $\pi$ ; 而是  $0 \sim \pi$  中间的某一值。从而使间隔层厚度的确定发生困难,因为反射相移的影响,其值不再简单地  $\frac{\lambda_0}{2}$  的整数倍,  $\lambda_0$  为滤光片主峰