

# 高灵敏激光微能量计

黄关龙 于桂秋

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文描述一种激光微能量卡计的原理、结构和实验特性。讨论了误差, 该卡计的精确度优于  $\pm 7\%$ 。

## A highly sensitive microenergy laser calorimeter

Huang Guanlong, Yu Guiqiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** This paper describes the principle, structure, and performances of a highly sensitive microenergy laser calorimeter. The errors are discussed and its accuracy is better than  $\pm 7\%$ .

以量热法为基础的卡计是当前激光能量测量的主要手段。以往的以金属丝热电偶、半导体热电堆等为测温元件的卡计, 由于灵敏度较低, 必须配上高倍率的、性能良好的微伏直流放大器, 才有可能进行微弱激光能量的测量。我们研制的以热敏电阻为测温元件, 用电桥法进行测量的 H-J 高灵敏数字式激光微能量计, 灵敏度为原有卡计的几百倍至数千倍, 不需要用微伏直流放大器, 就可以对毫焦耳甚至更小的微激光能量进行测量。而且结构简单, 性能稳定, 适合于一般中小实验室对测量微激光能量的需要。

### 一、原 理

卡计的工作原理是吸收体在吸收激光辐射后内能发生变化, 吸收体的温度变化与所吸收的能量之间的关系为:

$$\alpha E = mc\Delta T \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为吸收系数;  $m$ 、 $c$  分别为吸收体的质量和比热;  $\Delta T$  为吸收体的温度变化量。

热敏电阻的阻值随温度而变化, 测量安置在吸收体上的热敏电阻阻值变化, 即可测量出吸收体的温度变化。热敏电阻的电阻温度系数一般为非线性, 但当温度变化不大时, 例如在  $2\sim 3$  度范围内, 其曲线斜率基本不变, 可以认为是线性的。在卡计中, 吸收体在吸收激光辐射后造成的温度变化一般很小, 通常不大于  $0.1^\circ\text{C}$ , 在微激光能量测量时温升还更小, 在这种条件下, 热敏电阻的电阻温度曲线是一条直线, 非线性误差可以忽略不计。热敏电阻的阻值变化可以采用广泛应用的电桥法进行测量。由于在卡计中, 我们需要测量的是吸收体在吸收激光辐射后的温度变化量  $\Delta T$ , 而不是吸收体温度的绝对值, 也就是只要测量热敏电阻阻值的相对变化量而不是其绝对值, 所以, 采用简便、可靠的非平

收稿日期: 1981年8月27日。

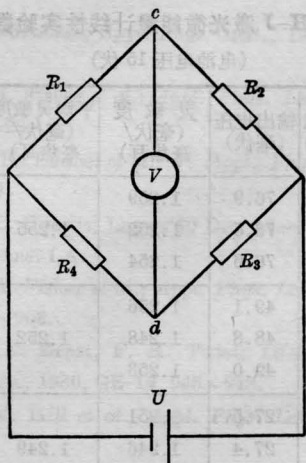


图1 电桥原理图

平衡电桥是非常合适的。非平衡电桥的电路及工作原理见图1。电桥的臂电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  在满足关系  $R_1R_3=R_2R_4$  时， $c$ 、 $d$  端的电压差为0，即电桥达到了平衡。如果1臂电阻发生了变化，变为  $R_1+\Delta R$ ，则电桥的平衡状态被破坏，在  $c$ 、 $d$  端将出现电压差  $V$ ：

$$V = \frac{U_0 \Delta R R_3 + R_1 R_3 - R_2 R_4}{[(R_1 + \Delta R) + R_2](R_3 + R_4)} \quad (2)$$

当  $R_1=R_2=R_3=R_4=R$  时，即为等臂电桥条件，则

$$V = \frac{U_0}{2} \frac{\Delta R}{[2R + \Delta R]} \quad (3)$$

(3)式表示了电桥输出电压与臂电阻变化值的关系，这关系为非线性的。但当  $\Delta R \ll R$  时，(3)式可写为：

$$V_0 = \frac{U_0}{2} \frac{\Delta R}{2R} \quad (4)$$

我们设  $\Delta R = nR$ ， $n$  为阻值相对变化率，则

$$V_0 = \frac{U_0}{2} \frac{n}{2} \quad (5)$$

(4)式与(5)式说明，在  $\Delta R \ll R$  或  $n \ll 1$  的条件下，电桥的输出电压与臂电阻的变化值或臂电阻阻值相对变化率成线性关系。在卡计中， $\Delta R \ll R$  或  $n \ll 1$  这个条件是满足的，因为热敏电阻的温度系数为  $3 \sim 4\%$ 。吸收体的温升仅  $0.1^\circ\text{C}$ ，所以阻值变化  $\Delta R$  不大于  $0.004R$ 。

电桥的非线性误差用  $\Delta$  表示：

$$\Delta = \frac{V - V_0}{V_0} = -\frac{n}{2+n} \quad (6)$$

计算表明， $\Delta R \ll 0.004R$  或  $n < 0.004$  时，电桥的非线性误差小于  $0.2\%$ 。

## 二、H-J 激光微能量计结构

H-J 激光微能量计的结构简图见图2。吸收体采用  $0.2$  毫米厚的阳极氧化铝片，直径为  $\phi 15$ ，表面涂有黑磁漆，在脉冲时间毫秒级、波长为  $1.06$  微米的激光作用下，表面损坏阈值为  $1$  焦耳/厘米<sup>2</sup>。热敏电阻采用 MF-51 型珠状热敏电阻，温度系数为  $3 \sim 4\%$ ，阻值在  $1 \sim 6$  千欧之间，在吸收体背面  $\phi 10$  的圆周上，用导电胶粘贴热敏电阻二个，分别接在电桥的1、3臂上，电桥的2、4臂接补偿电阻，补偿电阻为同型号的热敏电阻。在吸收体背面中心  $\phi 6$  范围内，绕有  $0.04$  毫米直径聚脂锰铜丝作定标器，它的电阻约  $300$  欧姆。定标器和吸收体保持良好的热接触。在激光入口处，装有红外滤光片。

为了保证卡计测量的稳定性和可靠性，结构上采用二层热屏罩，外加卡计外壳，在激光入口处装有遮光筒。

采用 PZ-26 数字电压表显示，也可用其他类型数字电压表，或者 AC15/6 检流计。

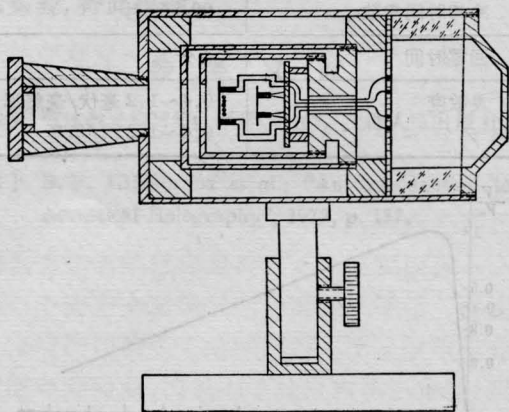


图2 H-J 激光微能量计结构简图

表 2 H-J 激光微能量计线性实验数据

(电池电压 15 伏)

序号	输入能量 (毫焦耳)	输出电压 (毫伏)	灵敏度 (毫伏/ 毫焦耳)	平均灵敏度 (毫伏/ 毫焦耳)	备注
1	61.1	76.9	1.259	1.255	200 毫伏 档
2		76.5	1.252		
3		76.6	1.254		
4	39.1	49.1	1.256	1.252	200 毫伏 档
5	39.1	48.8	1.248		
6	39.1	49.0	1.253		
7	22.0	27.5	1.251	1.249	200 毫伏 档
8		27.4	1.246		
9		27.5	1.251		
10	14.1	17.4	1.236	1.243	200 毫伏 档
11		17.5	1.243		
12		17.6	1.250		
13	14.1	17.79	1.264	1.264	200 毫伏 档
14		17.78	1.264		
15	6.3	7.88	1.259	1.265	20 毫伏 档
16		7.93	1.267		
17		7.94	1.268		
18	1.6	1.92	1.231	1.234	200 毫伏 档
19		1.93	1.237		
平均灵敏度 $1.252 \pm 0.83\%$					

### 三、卡计参数及实验特性

(1) 主要参数见表 1。

(2) 响应曲线采用电容放电法测定卡计的响应曲线, 电容放电时间为毫秒级, 测定的曲线见图 3。曲线已经进行了归一化。

(3) 重复精度测量

采用标准灯定标、电容放电定标和二卡计激光比对实验, 对 H-J 激光能量计的重复精度进行测量。实验结果表明, 标准灯作光源对卡计进行测定, 重复精度为  $\pm 0.46\%$  (包括标准灯波动等误差), 用相同能量的电能输入卡计, 重复精度为  $\pm 0.2\%$ , 而两卡计进行激光比对, 其比值的重复精度为  $\pm 0.7\%$ 。因此, 该卡计连续重复测量的误差不大于  $\pm 1\%$ 。

(4) 能量计的线性

用电容放电定标装置, 分别用不同能量注入卡计, 测量卡计的线性误差, 结果见表 2。从表中的数据表明, 在 1.56~61 毫焦耳范围内, 卡计的线性误差为  $\pm 0.83$ , 不大于  $\pm 1\%$ 。

表 1 H-J 激光微能量计简要参数

最大使用口径	$\phi 10$
能量范围	0.1~500 毫焦耳
响应时间	2~3 秒
冷却时间常数	20~50 秒
回零时间	4 分
灵敏度	0.4~1.2 毫伏/毫焦耳 0.4~1.2 伏/焦耳

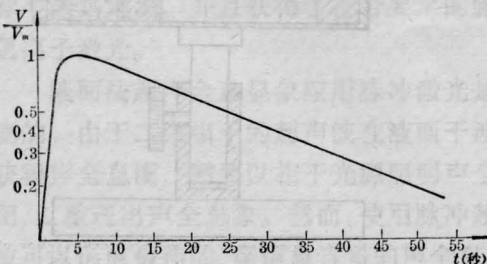


图 3 H-J 激光微能量计响应曲线

### 四、误差

H-J 激光微能量计的误差由以下几方面构成:

① 吸收体吸收层对激光辐射吸收不完全, 我们采用的吸收体是平面型, 吸收层为黑磁漆, 经测量, 对 1.06 微米激光的吸收率约 96% 左右。

② 实验测定的卡计重复精度误差不大于  $\pm 1\%$ 。

③ 实验测定的卡计线性误差不大于  $\pm 1\%$ 。

④ 由于我们使用的范围很窄, 卡计中使用的热敏电阻非线性误差可以忽略不计。

⑤ 非平衡电桥的非线性误差为

(下转第 471 页)

一下如何选取插值次数。

在函数逼近中,多项式函数类是最方便的。设“给定函数”(被插值函数)是 $f(x)$ ,逼近函数(插值函数)为 $\varphi_n(x)$ 。选择 $\varphi_n(x)$ 有许多方法,如何确定最合适的 $\varphi_n(x)$ 是很麻烦的问题。应选择几点插值比较好,取决于被插值函数的性质分析,由于插值问题的唯一性,插值函数 $\varphi_n(x)$ 的拉格朗日形式、牛顿形式以及逐次线性插值是相同的,我们不妨借用均差计算来进行判断。把已知结点 $x_i$ 对应的函数值 $y_i$ 作出均差表( $i=0, 1, 2, 3, \dots$ )示出各阶均差,若 $m$ 阶均差为零或接近零,则可用 $m-1$ 次插值,即一元(或二元) $m$ 点插值(若列表函数 $y_i$ 是按自变量 $x_i$ 等距的点给出的,函数变化率与自变量区间无关,因而就不必用均差而用更简单的差分)。必要时采用分段插值而不采用高阶插值。然而在实际问题中往往由于列表函数 $y_i$ 存在舍入误差,或用多项式逼近“给定函数”误差较大,使各阶均差都不出现为零或近于零的情况,这时我们可以根据每个插值点的各阶余项 $R_n(x)$

进行判别, $R_n(x) = f(x) - \varphi_n(x)$ ,计算各阶余项 $R_k(x)$ 取之其中绝对值最小的余项 $R_k(x)$ 所对应的阶数 $k$ ,即我们就可采用 $k$ 次插值,即 $k+1$ 点插值。如图3所示, $|R_k(x)| = \min |R_n(x)|$ 。插值次数 $n=1, 2, 3, \dots$ 。最后还可通过插值结果来检验选取的是否恰到好处。相信随着“数值逼近”的发展,会有更恰当的最佳方法,要注意选取。

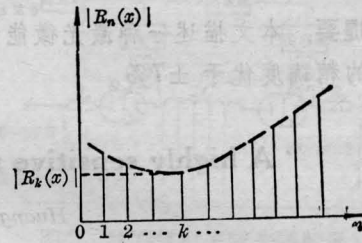


图3 余项绝对值与插值次数的关系

### 参 考 文 献

- [1] B. R. Brown, A. W. Lohmann; *IBM Journal of Research and Development*, 1969, **13**, No. 2, 160.
- [2] T. Yatagai, H. Saito; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 4, 558.
- [3] 郑 辉等;《激光》, 1981, **8**, No. 3, 19.

(上接第474页)

$$\Delta = \frac{V - V_0}{V_0} = -\frac{n}{2+n}$$

前面已经讨论过,在卡计中 $\Delta R$ 通常不大于 $0.004R$ ,即 $n < 0.004$ ,由上式计算可知,其非线性误差不大于 $\pm 0.2\%$ 。我们对电桥的非线性进行过实验测定,测得的结果完全符合上述公式。

⑥ 我们采用的电容放电电定标装置,定标误差不大于 $\pm 1\%$ 。

综上所述,II-J激光微能量计的精度为 $\pm 2\%$ ,准度优于 $\pm 7\%$ 。

由于吸收面对激光辐射的不完全吸收在

特定波长是一个定值,因此可作适当的修正,测量准度可适当提高。

### 参 考 文 献

- [1] E. D. West; *J. Res. NBS (A)*, 1972, **76**, 13~26.
- [2] Gunm. S. R.; *J. Phys. (E)*, 1972, **6**, No. 2, 105~114.
- [3] Franzen D. L.; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 12, 3115~3122.
- [4] R. Thiel;《非电量电测法》,人民邮电出版社,1981年版。
- [5] 《电桥理论与计算》,上海科学技术出版社,1964年版。