

# 大口径能量计定标和误差分析

王春奎 傅裕寿 李淑英 方慧英

本文描述了用小功率连续CO<sub>2</sub>激光器,定标短脉冲、大口径、大能量的激光能量计的方法,并且详细地讨论了误差的修正。

## 一、引言

阳极化的铝板作探测元件<sup>[1]</sup>,能吸收96%以上的被测光,使转变为热,再通过热电堆变为电信号进行测量。我们用它制作了口径 $\phi$ 100mm的能量计,用以测量每个脉冲100~500J能量的自制电子束脉冲CO<sub>2</sub>激光器的能量。激光器的脉冲宽度是 $\mu$ s级的。但是,目前 $\mu$ s级的脉冲能量计定标,还是用连续光源。这使热电型能量计定标,特别是大口径短脉冲的能量计的定标误差,大大增加。有必要认真地作误差修正。特别是一些系统误差引起的热损失,应该修正。以便在使用中,使误差尽量减小。得到更准确的测量结果。

## 二、光定标装置

我们用一台功率可调的,功率输出稳定性在1%以内的连续波CO<sub>2</sub>激光器作光源。借助于时间继电器带动的挡板,将连续光变为几秒级的脉冲光源。继电器同时将连续He-Ne激光变为与CO<sub>2</sub>激光完全同步的脉冲输出光。光脉冲的持续时间用光电二极管、光线示波器由测量脉冲He-Ne光的脉冲宽度得到。通过继电器挡板所得脉冲CO<sub>2</sub>激光,用透镜扩束,再送入待定标的能量计,或标准鼠笼能量计\*。它们将热能转换为电信号,用P<sub>2</sub>-8数字电压表及LY-4打印机记录。方块图如图1。

一般功率计的响应时间与测量周期时间相差不大,监视功率计的作用不大,故没有采用。

## 三、误差源的分析及实验测定系统误差

用一块阳极化的平铝板作探测元件,那么被测光经入射后,从探测元返回的光对能量计的灵敏度不再有贡献。它构成仪器的系统误差之一。这种误差在定标中需要修正,在定标后的使用中也必须修正。

收稿日期:1986年5月12日。

\*标准鼠笼能量计是在1977年1月广州全国大功率计标准比对会上曾与国家标准功率计比对,相差<1%。

我们用积分球测试了所用几种同类的阳极化铝板的总反射率是3.5%。故此误差必引起总能量3.5%的损失。它与脉冲宽度无关。它在能量计可用的阈值范围内为定值3.5%。

另一部分重要的能量损失是对流、辐射及热传导。当用能量计测量 $\mu\text{s}$ 级的脉冲能量时，如果探测元尺寸与激光光斑尺寸相等，则由于对流、辐射及热传导引起的能量损失，都可以忽略。这在文献[2]中，已论述得非常清楚，此不赘述。但为使用秒级的脉冲，以及所用光斑尺寸与探测元的大小相差较大时，由于传热问题引起的系统误差，必须给予修正。

从被测光辐照到探测元开始，探测元与环境处于平衡态的温度状态，开始被破坏了。由热传导、辐射、对流等传热理论知道，开始高于环境温度的探测元，将向周围环境传热。随着它们的温差的增加，热损失也增大。在测量中，从光辐照开始，直到探测元热电堆所在一侧的温度达到最大值为止的热损失，将引起测量的误差。

这部分热损失，由于光强分布不均匀，光斑的形状复杂，光斑尺寸大小与探测元不一致等等原因，单纯从理论计算比较复杂，我们从理论与实验结合入手。既实际又简单，也能得到预期的结果。

从实验得到探测元热电堆一侧的温度时间曲线，如图2所示。当 $t=13.5\text{s}$ 时，温升达到最大值。它反映的虽是热电堆一侧的温度时间曲线，但是，入射光一侧也基本相似，完全可

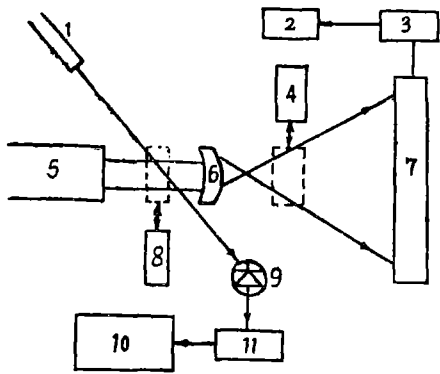


图1 定标系统简图  
1. He-Ne激光器；2. 打印机；3. 数字表；4. 标准能量计；5. CO<sub>2</sub>激光器；6. 透镜；7. 能量计；8. 快门；9. 光电二极管；10. 示波器；11. 前放

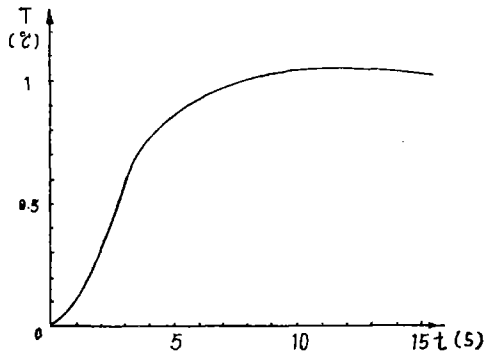


图2 10.6 $\mu\text{m}$ 光辐照4.5s时，激光能量计的典型响应曲线

以用它代替。只是从时间上，它落后一个从前表面传到后表面的热传播时间 $\tau$ [2]。

$$\tau = d^2 \rho c / 4k + 2d^2 \rho_1 c_1 / 4k_1$$

$\tau$ 值很小，可忽略。

图2中的曲线， $\Delta T$ 从0到最大值，可由下式描述：

$$\Delta T = T_2 - T_1 = a(c e^{-bt} - 1) \quad (1)$$

当 $t=0 \sim 1.6\text{s}$ 时， $a = -0.31415^\circ\text{C}$ ， $b = 0.481212\text{s}^{-1}$ ， $c = 1$ ；当 $t=1.6 \sim 13.5\text{s}$ 时， $a = 0.99^\circ\text{C}$ ， $b = 0.481212\text{s}^{-1}$ ， $c = 1.78$ 。

式中， $\Delta T$ 是探测元温度 $T_2$ 与环境温度 $T_1$ 之差； $t$ 是时间，从 $\Delta T \geq 0$ 开始计时，以s为单位。

下面根据图2的 $\Delta T-t$ 曲线，计算探测元的热损失。

$$\text{辐射: } \frac{dQ}{dt} = A \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (2)$$

$$Q = A \cdot \sigma \cdot \int_0^{T_{\text{最大}}} (T_2^4 - T_1^4) dt \quad (2')$$

对于阳极化的铝板其总辐射热 $Q_1'$

$$Q_1' = \epsilon Q_1 = 0.3 Q_1 \quad (3)$$

$$\text{对流: } \frac{dQ_2}{dt} = A \cdot h \cdot (T_2 - T_1) = A \cdot h \cdot \Delta T \quad (4)$$

$$Q_2 = A \cdot h \int_0^{T_{\text{最大}}} \Delta T dt = A \cdot h \int_0^{T_{\text{最大}}} a(c e^{-dt} - 1) dt \quad (5)$$

$$\text{传导: } \frac{dQ_3}{dt} = k \cdot A' \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (6)$$

$$Q_3 = \left( \frac{k_1 A_1'}{\Delta x} + \frac{k_2 A_2'}{\Delta x} \right) \cdot \int_0^{T_{\text{最大}}} \Delta T dt$$

$$Q_3 = \frac{A'}{\Delta x} (k_1 + k_2) \cdot \int_0^{T_{\text{最大}}} a(c e^{-bt} - 1) dt \quad (7)$$

$$\text{总传热损失: } Q = Q_1' + Q_2 + Q_3 \quad (8)$$

式中,  $A$ 是探测元前后表面积,  $\sigma$ 是Stefan-Boltzmann常数,  $\sigma = 5.669 \times 10^{-12} \text{W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$ ,  $h$ 是对流热传导系数, 取 $h = 5 \times 10^{-4} \text{W/cm}^2 \cdot \text{C}$ ,  $\epsilon$ 是发射系数, 对阳极化的铝板取 $\epsilon = 0.3$ [3],  $k_1, k_2$ 是热电偶丝的热导率, 取 $k_1 = 4 \text{W/cm} \cdot \text{C}$ ,  $k_2 = 0.22 \text{W/cm} \cdot \text{C}$ ,  $A'$ 是热电偶丝的截面积,  $T_1 = 302 \text{K}$ .

由上述各式算得对应于图2曲线之 $Q$ 为1.33J.

由于标准能量计与被标能量计距光源距离不同, 因而带来大气衰减不同引起的系统误差。根据大气衰减资料[5]计算, 由此引入的系统误差约为0.02%, 可以忽略不计。

综上所述, 反射及传热两项损耗是主要的系统损耗。可由上述的实验及计算修正之。但经修正后, 在测量的结果中仍然引入一定的误差。

总反射率测量中, 经修正后, 可能引入的误差即为反射测量的误差。即 $\epsilon = 0.03\% + 2/85 = 2.4\%$ [4,7]。

传热损失的测量与计算中, 经修正后, 也还引入一定的误差。在(3)、(5)、(7)式中 $\Delta T$ 是由数字表测试所得, 它的误差决定于数字表的误差[4,7]。这个误差相当于每点温度测量的绝对误差最大值为 $\pm 0.026 \text{C}$ 。由这个温度误差, 用(3)、(5)、(7)式可求出相应的热量传播测量误差的最大绝对值为 $+0.05 \sim -0.04 \text{J}$ 。相对误差 $< 0.1\%$ 。

偶然误差

数字表  $0.03\% \pm 2$ 个数字/ $u_x = 2.5\%$

光线示波器  $< 1\%$

本文采用的

标准鼠笼  $< 1\%$

激光器不稳定性 <1% (短时间内)

由上述各测量误差值及导出误差值,用文献[6]误差传递公式计算的总测量结果的误差 <8%。

#### 四、结果及讨论

定标结果如表1。从表1得到每焦耳的耦合能量引起热电势平均为6.7 $\mu$ V/J。

表1 实验结果

输入能量	耦合能量	传热损失	温升	灵敏度
Wt(J)	Wt $\times$ 0.965(J)	H(J)	T( $\mu$ V)	( $\mu$ V/J)
119.9	115.7	1.33	780	6.8
125.6	121.2	1.33	800	6.7
119.0	114.8	1.33	770	6.8

用所标能量计测量光斑尺寸与探测元尺寸相当的 $\mu$ s级短脉冲激光能量时,其能量由下式计算

$$W = \frac{V}{6.7 \times 0.965} = 0.15V = \frac{V}{6.5 \mu\text{V/J}} \quad (9)$$

式中, V以 $\mu$ V为单位的热电势, W以J为单位的被测能量。其误差小于8%。

当光斑尺寸小时,尽管是短脉冲,也需要作误差修正。

另外本能量计配合计时装置也可当作连续波CO<sub>2</sub>激光器的功率计使用。

从所得各误差项可见,主要误差项是数字表部分。这是由于能量计的灵敏度设计偏低引起的。

#### 参 考 文 献

- [1] 方慧英, 王春奎, 《四川激光》, 1984年, 第5卷, 第1期, 第32页。
- [2] J.H.Jacob, et al, Rev.Sci.Inst., 1973, Vol.44, No.4.
- [3] J.P.Holman, Heat Transfer, Fourth Edition, New York, 1976, P.508.
- [4] Pz-8型直流数字电压表产品说明书。
- [5] R.E.Roberts, et al, Appl.Opt., 1976, Vol.15, No.9, P.2085.
- [6] 冯师颜编, 《误差理论与实验数据处理》, 科学出版社, 1964年, 第1版。
- [7] 冯占岭, 《电子测量技术》, 1982年, 第1期, 第15页。