

长脉冲高能激光能量测试技术的研究*

黎高平 王雷 杨照金 于帅 赵宝珍 胡容

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

孔小健

(华中科技大学光电工程系, 武汉 430074)

摘要 用锥形腔量热式激光能量计, 测量了在不同脉冲宽度条件下, 脉冲激光能量和激光吸收腔温升之间的关系, 并用传统的方法得到不同激光能量对应的温升, 并按照有关公式计算得到激光能量, 结果表明实际激光能量和按传统方法计算得到的激光能量之间存在较大的差距; 我们从理论上分析了由于热辐射、热传导影响, 得出锥形吸收腔时间温度曲线关系的数学模型; 用该数学模型对测量得到温度时间曲线进行最小二乘法拟合, 拟合曲线和实际曲线非常吻合; 通过该曲线我们对测量结果进行修正, 和传统数据处理方法比较, 该方法得到的结果更接近真值。

关键词 长脉冲高能激光; 量热式激光能量计; 热辐射; 热传导; 锥形吸收腔

中图分类号 TN247; TB96 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 氧碘化学激光器 (COIL-Chemical Oxygen-Iodine Laser) 及氟氙化学激光器 (DF-Chemical Fluorine-Deuterium Laser) 目前最有希望的高功率、高能量、长脉冲的激光光源, 据有关文献报道, 最大输出功率可达 2200 kW^[1], 脉冲时间可达 20 s, 激光能量可几十兆焦耳。而目前国内外的激光能量计最大测量能量上限为 300 J, 标准接收口径仅 $\phi 60$ mm, 而万瓦级功率计的响应时间最小为几 min^[2-5], 因此无论用现有的功率计还是能量计都无法满足高功率、高能量激光器的要求^[6]。本文用现有的连续激光器模拟不同脉冲宽度及脉冲能量的长脉冲激光器, 用量热法测量激光的能量, 并从理论上分析了由于热辐射及热传导对实验结果的影响^[7]。

1 实验装置及原理

我们采用锥形激光吸收腔, 如图 1 所示, 并在腔的外延均匀绕上铂电阻丝, 用高精度电阻表测量吸收腔的电阻变化 ΔR , 由于对铂电阻丝, 电阻和

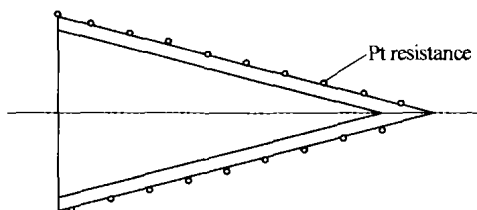


图 1 量热式激光能量计锥形吸收腔
Fig. 1 Schematic of the taper absorbed energy chamber

温度线性对应, 就可得出吸收腔相应的温度变化 ΔT 。精确测量出该吸收腔质量、比热容就可得出相应的激光能量

$$E = Mc\Delta T / \alpha(\lambda) \quad (1)$$

式中 E 为进入吸收腔内激光的能量 (J), M 为吸收腔的质量 (kg), c 为吸收腔材料的比热容 ($J/kg \cdot ^\circ C$), ΔT 为球体的温升 ($^\circ C$), $\alpha(\lambda)$ 吸收腔的吸收系数。

锥形吸收腔的角度为 30° , 激光平行入射到内表面, 理论上, 激光将锥形吸收腔内表面反射六次; 一般来说, 表面的吸收率为 90%, 经过六次反射后从吸收腔逸出的能量可忽略不计。因此, 我们可以近视为 $\alpha(\lambda) = 1$ 。

采用的模拟实验装置如图 2 所示, 用功率为 27 W 连续 YAG 激光器作为激光光源, 用计算机控制步进电机的转动, 来控制激光的通光时间; 铂电阻的纯度达到 99.99%, 满足国标要求。用 Fluke 1529 电阻表测量锥形吸收腔上电阻的随时间变化曲线。

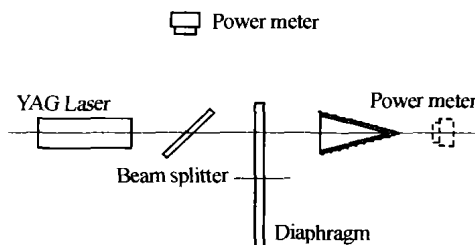


图 2 模拟实验装置图
Fig. 2 Schematic of simulate experimental setup

用经过标定的两个中功率计测量激光经过分束镜后, 透过的功率和反射功率的大小, 从而得到分束镜的分束比。然后将锥形吸收腔式激光能量计放置于主光路上, 用计算机控制通光时间 t 。并用监视功率计测量到达吸收腔的激光功率 P , 由此就可得到

* 国防科技预研基金资助项目 (BZJ010103)
Tel: 029-88288186 Email: gaopingl@pub.xaonline.com
收稿日期: 2003-08-13

到达锥形吸收腔的激光能量

$$E = Pt \tag{2}$$

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

通过计算机控制连续 YAG 激光的透光时间,分别为 3.58 s, 26.80 s, 89.45 s 到达光锥的能量分别为 93.7 J, 678.0 J 及 2415 J, 测量得到的电阻随时间变化曲线如图 3(a) ~ (c) 所示.

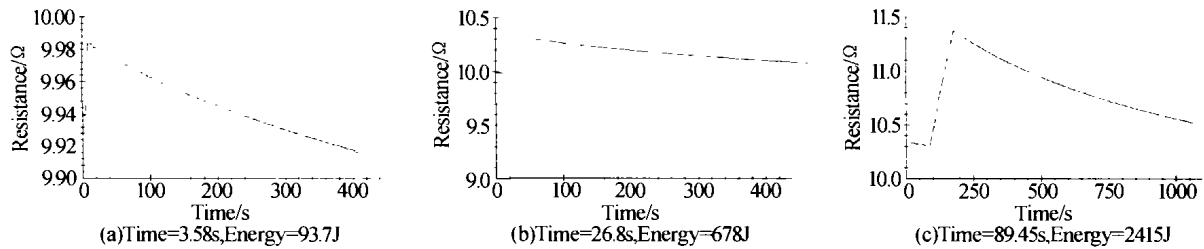


图 3 不同脉冲宽度能量的激光得到时间电阻曲线

Fig. 3 Time resistance curve using different pulse width and energy laser

表 1 修正前得到的测试结果和实际能量之间的偏差

脉冲宽度/s	实值/J	修正前测试值/J	不确定度/(%)
3.58	93.7	90.0	4.0
26.8	678	628.2	7.3
89.5	2415	2158.9	10.6

通过表 1 可以看出,用传统方法进行数据处理引入的相对不确定度将随激光脉冲时间变长而增大.

2.2 理论分析

2.2.1 热辐射损失

引起测量不确定度变大的原因就是激光吸收腔的热辐射及热传导. 在 dt 时间范围内吸收腔由于热辐射所损耗的能量为

$$dE = A\sigma(T^4 - T_0^4)dt \tag{3}$$

式中: dE 为辐射损耗的能量, σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量, A 为锥形吸收腔的外面积, T 为锥形吸收腔的温度, T_0 为环境温度.

2.2.2 热传导

锥形吸收置于空气中将向空气中传递热量, 同时锥形吸收腔通过隔热材料向外传递热量.

a) 空气热传导方程

锥形吸收置于空气中将向空气中传递热量, 同时锥形吸收腔通过隔热材料向外传递热量; 首先, 我们来考虑向空气中传递热量, 由导热微分方程, 我们可以得出笛卡儿坐标系中三维非稳态导热微分方程的一般形式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \tag{4}$$

式中, ρ , $\dot{\Phi}$, k 及 t 分别为锥形吸收腔微元体的密度、单位时间内单位体积中内热源的生成热及时间. 在

当激光脉冲宽度很小 (< 10 ms) 时, 一般用电阻的最大最小值之差, 来表示激光能量的大小; 这是由于在如此短的时间范围内, 吸收腔的热辐射及热传导可以忽略不计. 当激光脉冲宽度大于 10 ms 时, 用该方法得出的激光能量和实际能量之间的偏差将随激光脉冲宽度的增加而变大, 按式 (1) 计算得到的测试结果和由式 (2) 得到的实际能量的偏差如表 1 所示.

此我们认为材料的导热系数为常数, 式 (4) 简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \tag{5}$$

式中, $a = k/\rho c$; 由于铜的导热系数远大于铜和空气间的导热, 因此可忽略物体内部导热热阻, 那么锥形吸收腔内温度与坐标无关, 所以式中对坐标的导数项均为零. 于是上式简化为

$$dT/dT = \dot{\Phi}/\rho c \tag{6}$$

其中 $\dot{\Phi}$ 应看成广义热源. 锥形吸收腔和空气之间的热交换可折算整个锥体的热源

$$-\dot{\Phi}V = Ah(T - T_0) \tag{7}$$

因为锥形吸收腔被冷却, 当时间趋近无穷大时, 温度趋近 T_0 , 于是有

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_0) \tag{8}$$

通过对该微分方程从 0 到 t 积分, 有

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = \exp \left(-\frac{hA}{\rho c A} t \right) \tag{9}$$

式中, T_0 是环境温度也是锥形吸收腔最终所达到的温度, T_s 是锥形吸收腔所达到的最高温度也是计算的初始温度, A 是锥形吸收腔的面积, V 是锥形吸收腔的体积. 由此可以得到在 dt 时间内传导热量

$$\dot{\Phi} = (T_s - T_0) hA \exp \left(-\frac{hA}{\rho c V} t \right) \tag{10}$$

b) 隔热材料热传导方程

锥形吸收腔通过隔热性能较好的聚四氟乙烯圆筒将锥形吸收腔和外面的金属材料隔离开, 尽管聚四氟乙烯的导热系数很小, 但对测量将带来一定的影响. 将式 (4) 变成圆柱坐标系

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (k \frac{\partial T}{\partial \varphi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \Phi \quad (11)$$

我们可将聚四氟乙烯圆筒简化成导热系数为常数、无内热源、稳态的导热问题, 导热微分方程(11)式可简化为

$$\frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T}{\partial r}) = 0 \quad (12)$$

边界条件的表达式为

$$r = r_1 \text{ 时, } T = T_r = r_0 \text{ 时, } T = T_0$$

通过对式(12)积分两次, 并利用边界条件得到其温度分布

$$T(r) = T + \frac{T_0 - T}{\ln(r_0/r_1)} \ln(r/r_0) \quad (13)$$

由此得到单位面积的热损失

$$q = -k \frac{dT}{dr} = \frac{k}{r} \frac{T - T_0}{\ln(r_0/r_1)} \quad (14)$$

通过聚四氟乙烯圆筒的热流量为

$$\Phi = 2\pi r l q = \frac{2\pi k (T - T_0)}{\ln(r_0/r_1)} \quad (15)$$

2.2.3 热对流方程

实验是在没有外部强制空气对流的环境中进行的, 由于空气在吸收腔的附近温度高, 远离吸收腔温度低, 因此在考虑吸收腔热量损失时应当包括自然对流的热损失. 由牛顿冷却公式得到热对流的热损失为

$$\Phi = hA(T - T_0) \quad (16)$$

2.3 热能损失方程

由式(3)、(10)、(15)可以得出在热辐射、热传导、热对流的共同作用下, 尽管热传导和热对流之间存在一定的关联, 在此认为他们是相互独立的. 锥形吸收腔温度下降和时间之间的关系

$$\rho c V dT = s\sigma(T^4 - T_0^4) dt + (T_s - T_0) hA \cdot \exp(-\frac{hA}{\rho c V} t) dt + \frac{2\pi k(T - T_0)}{\ln(r_0/r_1)} dt + hA(T - T_0) dt \quad (17)$$

在进行数拟合时, 右边的第三、四项可以合并, 该物理模型所有项简化, 得到

$$dT/dt = a_0 + a_1 T + a_2 T^4 + a_3 \exp(-a_4 t) \quad (18)$$

通过对测量得到的激光脉冲后的锥形吸收腔温度随时间变化曲线, 用式(17)进行最小二乘法拟合, 拟合结果如图4所示. 这样只要测量一段时间锥形吸收腔温度随时间变化曲线, 便可得到锥形吸收腔整个温度下降曲线; 由此我们可以得到温度上升时间范围内, 不同的温度点由于热辐射及热传导所损失导致的温度减小量, 通过对此进行积分便可得到在没有热传导及热辐射时锥形吸收腔所应达到

的温度. 从而对长脉冲激光能量的测量结果进行修正. 修正后得到不同脉冲宽度能量和实际能量如表2所示.

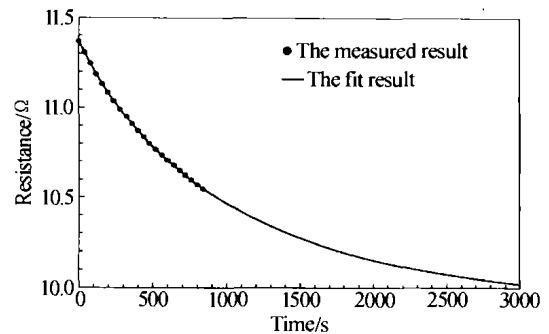


图4 时间电阻曲线
Fig.4 Time resistance curve

表2 修正后得到的测试结果和实际能量之间的偏差

脉冲宽度/s	实值/J	修正后测试值/J	不确定度 (%)
3.58	93.7	93.2	0.53
26.8	678	671	1.0
89.5	2415	2355	2.5

通过表2, 我们可以看出, 通过测量结果进行热辐射及热传导修正, 测量不确定度大大减小.

3 结论

本文从理论上较详细的分析了热辐射及热传导对量热式激光能量计测量长脉冲激光能量的影响; 并通过有关实验测量得到的锥形吸收腔吸收激光能量后, 测温电阻的电阻值随时间变化曲线, 用理论分析得到数学模型对该曲线进行最小二乘法拟合, 得出了锥形吸收腔温度下降曲线, 由此可对测量结果进行修正; 和传统数据处理方法比较, 该方法得到的结果更接近真值.

参考文献

- 1 黄勇, 侯海梅. 美国的战术高能激光武器. 激光技术, 2002, **26**(4): 273 ~ 276
Huang Y, Hou H M. *Laser Technology*, 2002, **26**(4): 273 ~ 276
- 2 Chamberlain G E, Simpson P A, Smith R L. Improvements in a calorimeter for high-power CW lasers. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1978, **IM-27**(1): 81 ~ 86
- 3 Smith R L, Russell T W, et al. A calorimeter for high-power CW lasers. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1972, **IM-21**(4): 434 ~ 438
- 4 Heard H G. *Laser parameter measurements handbook*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1968
- 5 Johnson E J, Jr. Evaluating the inequivalence and computational simplification for the NBS laser energy standards. *Appl Opt*, 1977, **16**(8): 2315 ~ 2321
- 6 霍夫曼 J P 著, 马云良译. 传热学. 北京: 人民教育出版社, 1997. 1 ~ 6

- Huofuman J P. Translated By Ma Yunliang. Heat conduction. 输出特性研究. 光子学报, 2003, 32(8): 907 ~ 910
Beijing: Higher Education Press, 1997, 1 ~ 6 Yang H R, Zuo T C. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 907 ~
7 杨鸿儒, 左铁钊. 全固体小型 Yb: YAG 激光器热效应及 910

Study on The Measurement of Long Pulse High Power Laser Energy

Li Gaoping, Wang Lei, Yang Zhaojin, Yu Shuai, Zhao Baozheng, Hu Rong
Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute Of Applied Optics, Xi'an 710065

Kong Xiaojian

Department of Optoelectrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2003-08-13

Abstract A taper absorbed energy chamber has been designed and processed to measure the relationship between the laser energy and the temperature of the taper absorbed energy chamber under different pulse width using the principle of calorimetry. The temperature rising curve of the taper absorbed energy chamber with different laser energy pulse and the pulse laser energy by means of calculation according to relative expression by use of traditional method have been gained. The results show that there exists great difference between the actual results and the measured results. Heat radiation and thermal conduct have been unanalyzed theoretically. The mathematical model of time temperature curve has been built. The fit curve got from this mathematical model good fit the measured curve. The measurement result has been revised by using the fit curve. The results uncertainty will reduce greatly after revising.

Keywords Long pulse high energy laser; Calorimetric energy meter; Heat radiation; Thermal conduct; Taper absorbed energy chamber



Li Gaoping was born on Mar. 27, 1966, in Tongcheng county, Hubei Province, P. R. China. He received his B. E. degree in Optical Engineering from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics in 1987. He earned his M. E. degree and Ph. D. in photoelectrical engineering from Beijing Institute of Technology in 1990 and 2000 respectively. Now he is undertaking his research work at Optical Metrology Laboratory of Xi'an Institute of Applied Optics, focusing on laser radiation parameter measurement. His research interests focus on optical measurement technology.