

强激光能量测量的电校准技术

唐菱 王超 刘华 陈骥 党钊* 彭志涛 胡东霞 代万俊 李小群

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 随着惯性约束聚变(ICF)激光驱动器的发展,激光光束口径逐渐增加,需要对大口径激光的能量进行精确测量,而目前国内 ICF 大口径激光能量测量的校准方式无法满足 ICF 激光装置功率平衡测量的精度要求(测量不确定度不大于 2%)。为解决此问题,提出了一种新型的电校准技术,以 Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 构成的半导体热电堆作为能量转换器件,进行了以电能量替代激光能量来实现对体吸收型激光能量计的校准技术研究,初步完成了光能量测量和电能校准的理论模型。理论分析结果表明,在室温环境下,使用电加热校准和激光加热校准在热力学上具有等效性,并通过初步的实验,论证了电加热校准技术应用的可行性。

关键词 激光技术;强激光;能量测量;体吸收;电校准;热电堆

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s108009

Electrical Calibration of High Intensity Laser Energy's Measuring

Tang Ling Wang Chao Liu Hua Chen Ji Dang Zhao Peng Zhitao

Hu Dongxia Dai Wanjun Li Xiaoqun

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract As the development of inertial confinement fusion (ICF) driver, the aperture of laser beam increases gradually, and the energy need to be measured precisely. However, the present calibration method doesn't satisfy the measuring precision degree (with uncertainty not greater than 2%). A new electrical calibration method of high intensity laser calorimeters is presented. Semiconductors consisting of Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 are used as energy converting devices. Research on calorimeters' calibration which uses electrical energy to substitute the laser energy has been done. Thermal model of volume-absorbing glass under pulsed-laser heating and electrical heating has been developed. Results show that, electrical heating and laser heating are equivalent in ambient thermodynamics models. Some experimental results have been obtained, which demonstrate the feasibility of the electrical heating's application.

Key words laser technique; high intensity laser; energy measuring; volume absorbing; electrical calibration; thermopile

OCIS codes 230.0040; 120.4640; 120.6810

1 引 言

随着惯性约束聚变(ICF)激光驱动器的发展,激光光束口径逐渐增加,为了准确获得激光束的实际输出能量,需要采用大口径的能量卡计。对于这种大口径激光能量的测量,通常都采用体吸收型激光能量计^[1]。

目前,国内尚未形成规范的大口径激光能量测量标准^[2],普遍采用针对标准卡计相互传递的办法,但在传递过程中,测量的不确定度会逐渐增大,由 2% 增大至 6%~7%,引起测量结果的准确性降低。

大口径能量卡计校准的主要难度在于需要较多的大能量激光发次,一般的激光实验平台无法提供

收稿日期: 2011-07-28; 收到修改稿日期: 2011-10-11

作者简介: 唐菱(1986—),女,硕士研究生,主要从事高功率固体激光装置能量测试技术方面的研究。

E-mail: atl_1234@163.com

导师简介: 李小群(1952—),男,研究员,主要从事高功率固体激光精密电器控制方面的研究。

E-mail: lixiaoqun229@163.com

* 通信联系人。E-mail: qingzhaodang@163.com

这样的条件。为了解决大口径能量卡计的快速校准问题,本文提出了一种能量卡计的电校准技术,以适应不同口径能量卡计的快速校准。主要是通过理论和实验两方面,对这种电校准方法进行较为系统的研究,论证这种新校准技术的可行性和有效性。

2 理论分析及建模研究

2.1 能量测量探头的工作原理

能量测量探头的工作原理如图 1(a) 所示^[3]。入射激光的能量被吸收体(材料一般为中性暗色玻璃)吸收以后,转换为吸收体的内能,表现为温度的

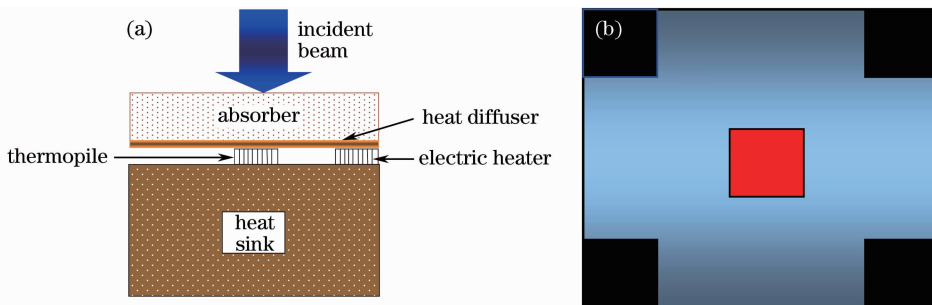


图 1 能量测量探头的结构。(a)能量测量原理;(b)传感器和加热器的横向分布

Fig. 1 Structure of laser energy detector. (a) Schematic of energy detecting; (b) distributing of sensors and heaters

2.2 能量测量探头的理论分析

假设吸收体最终吸收激光能量为 Q , 据传热学基本理论^[1,4~6], 可得

$$Q = c_g m_g \Delta T_{\max} + c_c m_c \Delta T_{\max}, \quad (1)$$

式中 m_g 、 c_g 分别为吸收体的质量和比热, m_c 、 c_c 分别为热匀体的质量和比热, ΔT_{\max} 为达到热平衡的最高温升。由于铜片的传热系数很高, 并且在实际操作中热匀体和吸收体采用了导热胶进行粘合, 因此认为吸收体和热匀体温度一致。设入射激光能量为 E_{in} , 吸收率为 η , 假定在传热过程中因传导、对流、辐射等方式, 耗散给外界的能量为 Q_{loss} , 则

$$\Delta T_{\max} = \frac{\eta E_{\text{in}} - Q_{\text{loss}}}{c_g m_g + c_c m_c}. \quad (2)$$

假设吸收体的吸收系数为 α , 厚度为 z_1 , 单位面积下 dL 微元内介质所吸收的抽运光能量为 $-dE = \alpha \times I_0 \exp(-\alpha L) dL ds dt$ ^[7]。其中, $I_0 = P/A$, 为抽运面单位面积的抽运功率, 则吸收体吸收的总能量为

$$E_{\text{abs}} = (1 - R_g) \int_0^t dt \int_0^d dL \iint_s \alpha I_0 \exp(-\alpha s) ds, \quad (3)$$

式中 R_g 为玻璃表面的反射率(在折射率假定为 1.5 时, $R_g = 4\%$), 根据光强、光功率以及能量之间的关系, 可得吸收的能量与吸收率之间的关系为

$$E_{\text{abs}} = (1 - R_g) E_{\text{in}} [1 - \exp(-\alpha d)], \quad (4)$$

升高, 热匀体为传热系数较高的铜片, 使热量均匀地分布在平面上, 热沉选择传热系数高的铝。热匀体与热沉之间均匀地分布着传感器和加热器, 其材料都为 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ 构成的半导体热电堆, 传感器在测量中用于测量温度的变化, 加热器在校准中用于对热匀体和吸收体加热, 提供等量替代能量, 如图 1(b) 所示, 黑色为测量用的传感器, 红色为加热器(见电子版)。为了方便实验进行, 所设计的能量测量探头尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 其中热电偶尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 吸收体采用了尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 的中性暗色玻璃 ZAB10。

得到在入射过程中, 激光吸收率为 $\eta_{\text{opt}} = (1 - R_g) \times [1 - \exp(-\alpha d)]$ 。设铜片表面的反射率为 R_c , 考虑反射过程中的吸收, 得到能量测量探头的总吸收率为

$$\eta_{\text{opt}} = (1 - R_g) [1 - R_c \exp(-2\alpha d)]. \quad (5)$$

在校准过程中, 理想情况下, 用于加热的电能被热匀体全部吸收并均匀地分散在入射面上, 近似可以看作全部被吸收, 又 $\eta_{\text{elec}} = 1$ 。同样, 有最大温升与电能量的关系:

$$\Delta T_{\max} = \frac{E_{\text{elec}} - Q_{\text{loss}}}{c_g m_g + c_c m_c}. \quad (6)$$

被测激光在时间和空间上均为高阶超高斯分布, 可近似视为均匀, 因此, 光强可以看作定值, 在入射过程中, 激光在吸收体上产生的生热率为^[8]

$$q_1(z) = \frac{\alpha Q (1 - R_g)}{L^2 \tau_p} \exp(-\alpha z), \quad (0 \leq z \leq \tau_p) \quad (7)$$

式中 L 为光束几何尺寸(对于实际测量激光, $L = 400 \text{ mm}$), τ_p 为脉宽($\tau_p = 3 \text{ ns}$)。考虑反射过程中的吸收, 设热匀体的反射率为 R_c , 可以得到光强被热匀体反射后在反射过程中吸收体上产生的生热率为

$$q_2(z) = \frac{\alpha Q (1 - R_g) R_c}{L^2 \tau_p} \exp[-\alpha(2d - z)], \quad (0 \leq z \leq \tau_p) \quad (8)$$

热匀体吸收激光能量之后在表面形成的热通

量为

$$F_3(z) = \frac{Q(1-R_g)(1-R_c)}{L^2 \tau_p} \exp(-\alpha z_1). \quad (9)$$

$(0 \leq t \leq \tau_p)$

电校准过程中,设热电偶用于加热的体积为 V ,加热功率为 P ,则在加热体上的生热率为^[9]

$$q_3 = P/V. \quad (10)$$

在室温环境中,选择吸收体和热匀体作为研究对象,得到其热力学模型如图2所示。

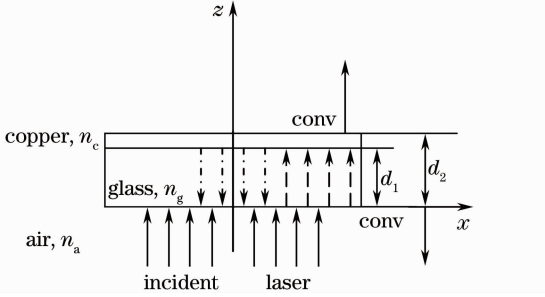


图2 吸收体的热力学模型

Fig. 2 Illustration of the thermal model

假定大口径能量计处在室温条件下,吸收体吸收激光能量之后的三维热传导方程为^[8~10]

$$\nabla^2 T_g + \frac{q_1(z)}{k_g} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_g}{\partial t}, \quad (11)$$

式中 k_g 为吸收体的热导率,热匀体的瞬态响应方程为

$$\nabla^2 T_c = \frac{1}{\beta} \frac{\partial T_c}{\partial t}. \quad (12)$$

式中 β 为吸收体的热扩散速率。

如图1(b)所示,吸收体背面贴上热匀体,吸收体正面和热匀体的背面都有对流和辐射热损失,假

定初始温度和环境参考温度为 T_0 ($T_0 = 300$ K),得到初始条件和边界条件为

$$T_g(x, y, z, 0) = T_c(x, y, z, 0) = T_0, \quad (13)$$

$$k_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_g [T_g(x, y, 0, t) - T_0] + \xi_c \sigma (T_g^4 - T_0^4), \quad (14)$$

$$-k_c \frac{\partial T_c}{\partial z} \Big|_{z=z_2} = h_c [T_c(x, y, 0, t) - T_0] + \xi_c \sigma (T_c^4 - T_0^4). \quad (15)$$

计算过程中假定吸收体和热匀体为理想接触(不存在热阻),可以得到分界面的边界条件为

$$T_g(x, y, z_1, t) = T_c(x, y, z_1, t), \quad (16)$$

$$k_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \Big|_{z=z_1} = k_c \frac{\partial T_c}{\partial z} \Big|_{z=z_1}. \quad (17)$$

由于侧面面积与入射面面积相比较小,侧面与外界交换热量可以忽略,认为侧面为绝热边界。

对于图2所示的热力学模型,基于(7)~(9)式的初始条件和(11)~(17)式的边界条件,在有限元分析软件中分别模拟了激光能量测量的过程,得到能量计测温区对不同量值的激光能量的响应度如图3所示。

如图3(a)所示,能量计探头测温区温度随时间的变化为慢响应过程,当温度上升至顶峰时,随着时间变化按指数下降;输入能量大小发生改变时,温度-时间的变化规律并不发生改变,只是峰值改变;对于不同大小能量值得到的曲线进行温度-时间积分计算,积分值随能量大小变化关系如图3(b)所示,当能量发生改变时,温度-时间积分值与能量具有很好的线性关系, $R_2 = 0.99993$ 。

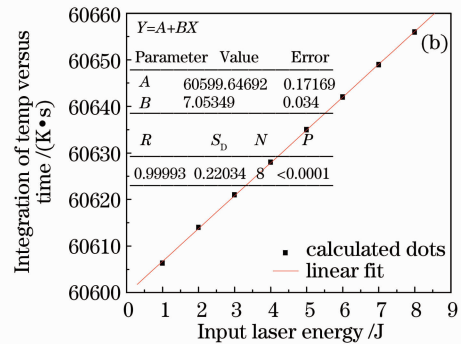
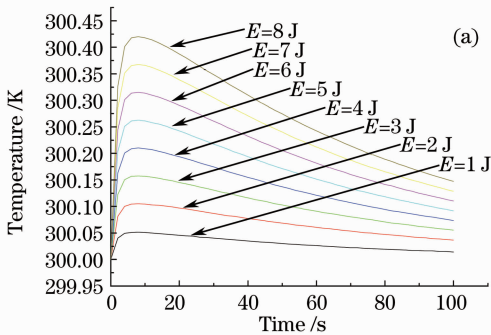


图3 能量探头对激光能量响应。(a)不同大小能量温度-时间响应曲线;(b)不同大小能量下的温度时间积分值

Fig. 3 Detector's response to different laser energies. (a) Temperature versus time under different energies;

(b) temperature-time integration versus different energies

同样,基于(10)式的初始条件和(11)~(17)式的边界条件,得到能量计对不同量值电能量的响应如图4所示。

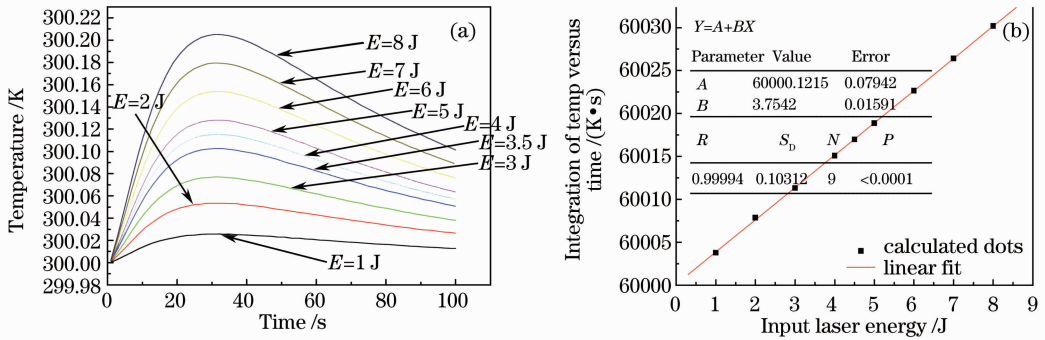


图 4 能量探头对电能量响应。(a)不同大小能量温度-时间响应曲线;(b)不同大小能量下的温度时间积分值
Fig. 4 Detector's response to different electrical energies. (a) Temperature versus time under different energies; (b) temperature-time integration versus different energies

如图 4(a)所示,能量计探头测温区温度对电能量具有类似的响应曲线,当改变输入电能量大小时,得温度-时间曲线积分值随输入能量的关系如图 4(b)所示,呈良好的线性关系, $R_2 = 0.99994$,而在实际大口径激光能量测量探头的设计中,加热体会比图 1 中更多,接触面积也更大,得到的结果会比图 4 更好。模拟结果表明,测量过程和校准过程在理论上具有可行性。

3 实验研究

3.1 能量测量探头激光校准

采用图 5(a)所示的激光能量校准光路^[11]对所设计的能量测量探头进行校准,其中分束器的分束比和扩束镜的透射率已通过实验测得,通过读出标准能量计的能量值计算输入被测能量计的能量,得到能量计对激光能量的响应曲线如图 5(b)所示。

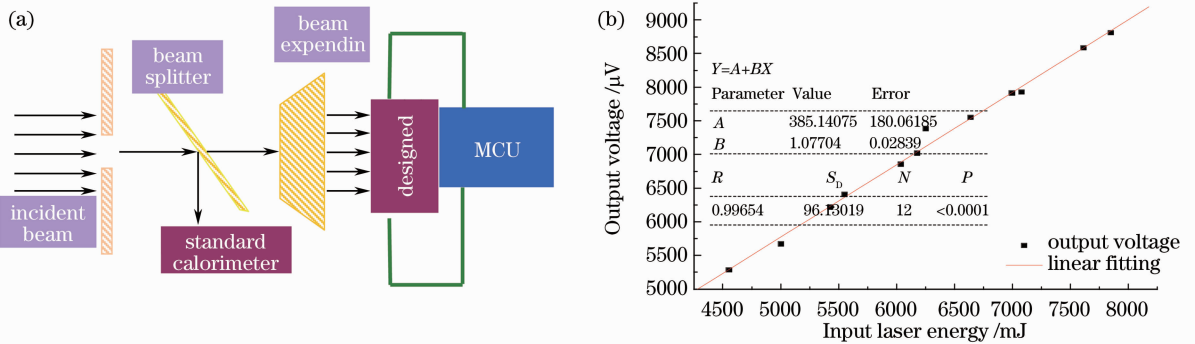


图 5 能量测量探头对激光能量响应。(a)实验光路图;(b)实验结果

Fig. 5 Experiment on energy detector's response to laser energy. (a) Experimental set up; (b) results

如图 5(b)所示,能量计对激光能量有较好的线性相应, $R_2 = 0.99654$,实验测试结果与如图 3(b)所示的理论计算结果符合性较好。

3.2 能量测量探头电校准

采用图 6(a)所示的电路结构进行能量测量探头的电校准实验研究,在加热部分中,时间控制采用 8051 单片机产生信号源,开关采用固态继电器,取样电阻为阻值较为稳定的合金电阻,用示波器 1 和示波器 2 记录加热的电压和电流以计算输入到能量探头的能量。

$$E = \int_0^t U(t)I(t) dt. \quad (18)$$

在测量部分中,采用运算放大器对所测得信号进行放大,并采用示波器 3 记录其波形,探头对电能量的电压(温度)-时间响应曲线如图 6(b)所示;对于不同大小的电能量,将图 6(b)中曲线进行积分处理,得到能量测量探头对不同大小电能响应度的曲线如图 6(c)所示。

将实验所得测温区电压(温度)随时间变化图 6(b)与计算所得图 4(a)相比较,发现测温区温度随时间具有相同的变化趋势;图 6(c)所示,能量计在从 1~8 J 的范围内对不同量值电能量具有很好的线性响应度, $R_2 = 0.994$,与计算结果图 4(b)相吻合,理论与实验同时验证了该项电校准技术的可行

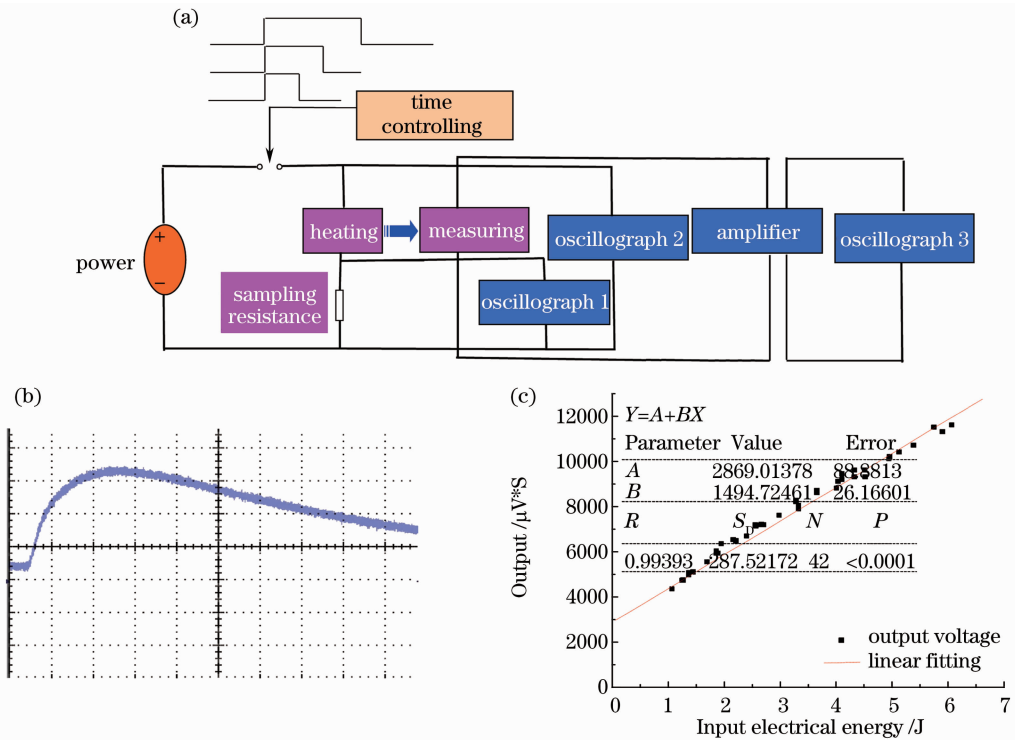


图6 探头对电能量响应测试实验。(a)实验电路图；(b)电压-时间曲线；(c)温度时间积分值与输入能量关系

Fig.6 Experiment on energy detector's response to electrical energy. (a) Experimental set up; (b) voltage versus time; (c) temperature-time integration

性,为大口径激光能量计的电校准技术研究提供了依据。

4 结 论

本文提出了一种新型基于热电堆的强激光能量测量电校准方法,并开展初步的理论与实验研究。模拟研究表明,在室温条件下,所设计的能量测量探头对激光能量和电能量都具有较好的线性响应;实验结果表明,能量测量探头的温度-时间曲线与模拟结果相吻合,能量计对于激光能量和电能量都具有较好的线性响应度,验证了电加热校准技术应用的可行性,该项研究结果为大口径强光能量测量的电校准技术研究提供了依据。

参 考 文 献

- Lin Kangchun, Tian Li, Ling Mingyi *et al.*. Bulk absorption calorimeter for measuring high power multiwavelength laser energy[J]. *Applied Optics*, 1998, **19**(4): 22~25
林康春, 田莉, 凌鸣逸等. 用于多波长高功率激光能量测量的体吸收能量计[J]. *应用光学*, 1998, **19**(4): 22~25
- Liu Guorong, Wu Hongcai. Research of calibration method for high energy laser energy meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 982~985
刘国荣, 吴洪才. 高能激光能量计校准方法研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 982~985
- Tang Ling, Li Xiaoqun, Dang Zhao *et al.*. Study on the absorber used in larger aperture high intensity laser energy measuring[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, **33**(3): 5~8
唐菱, 李小群, 党钊等. 大口径高功率激光能量测量吸收体

研究[J]. *电子测量技术*, 2010, **33**(3): 5~8

- Zhou Fuzheng. PE-calorimeter with broad spectra high sensitivity and fast response [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(10): 743~748
周复正. 宽波段高灵敏度快响应热释电型卡计[J]. *中国激光*, 1991, **18**(10): 743~748
- Sun Baogui. Laser energy measuring instruments and effects on measuring[J]. *Modern Measurement and Test*, 1998, (6): 45~47
孙宝贵. 激光能量测量装置及脉宽对测量的影响[J]. *现代计量测试*, 1998, (6): 45~47
- Yu Shuai, Li Gaoping, Yang Zhaojin *et al.*. Energy loss compensation of bulk absorption energy meter [J]. *Applied Optics*, 2007, **28**(5): 659~662
于帅, 黎高平, 杨照金等. 体吸收型激光能量计能量损失补偿方法的研究[J]. *应用光学*, 2007, **28**(5): 659~662
- Wang Junrong, Min Jingchun, Song Yaozu. Numerical simulation of temperature and thermal stress fields in the laser slab of a laser oscillator [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, **24**(5): 855~857
王军荣, 闵敬春, 宋耀祖. 板状激光振荡介质温度场和应力场的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2003, **24**(5): 855~857
- D. H. Chen, Z. M. Zhang. Thermal analysis of the volume absorber in pulsed excimer laser calorimeters[J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**(17): 3061~3072
- Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 178~188
杨世铭, 陶文铨. *传热学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 178~188
- Daiji Fukuda, Shinji Kimura, Mitiyuki Endo. Absolute energy reference calorimeter with bismuth telluride thermocouples for laser energy standard[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, **76**(11): 113107
- Tang Ling, Li Xiaoqun, Wang Chao *et al.*. Research of optimizing linearity of laser energy detecting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 293~297
唐菱, 李小群, 王超等. 激光能量测量线性度的优化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 293~297

栏目编辑:何卓铭