

强激光毁伤过程的热辐射谱测量

蔡红星, 胡馨月, 李昌立, 谭 勇, 徐立君, 毕 娟, 张喜和*
(长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要:以热辐射谱的温度反演为例,介绍了光谱技术在强激光毁伤过程中的应用。利用自制的高速光谱测量系统,实时采集了毁伤过程中的辐射光谱,基于普朗克黑体辐射原理,反演了毁伤区的温度,并应用主成分回归算法,计算得到了毁伤区的温度分布,实现了强激光辐照靶材过程中瞬态温度和温度分布的测量。光谱测量区在200~1 000 nm时,所对应的温度反演为700~6 000 ℃。

关键词:光谱技术;热辐射谱;激光毁伤;瞬态温度;温度反演

中图分类号:TN241; O433.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120503.0277

Thermal radiation spectral measurement of intense laser damage

CAI Hong-xing, HU Xin-yue, LI Chang-li, TAN Yong, XU Li-jun, BI Juan, ZHANG Xi-he*

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: xihezhang@sina.com

Abstract: The applications of spectral technologies in intense laser damage are introduced by taking the temperature retrievals of thermal radiation spectra for example. A self-made high speed spectrum measurement system is used to collect radiation spectra for intense laser damage in real-time. The damage zone temperature is obtained through the temperature retrieval based on the principle of Planck's black body radiation, and the temperature distribution of a damage zone is calculated by using the principal component regression. The measurements of transient temperature and temperature distribution for intense laser irradiating targets are realized, and the spectral range is 200 – 1 000 nm corresponding to the temperature retrieval range for 700 – 6 000 ℃.

Key words: spectral technology; thermal radiation spectrum; laser damage; transient temperature; temperature retrieval

1 引言

在研究激光与物质相互作用机理时,激光辐照靶材的温度变化是进行机理分析的基础,由于受限于本身的测试原理,传统测试手段无法实现瞬态温度及其温度变化过程的测量。瞬态温度是指强激光脉冲作用于物质表面时,在激光作用过程中或作用后很短一段时间内作用区的温度。激光辐照区瞬态温度的变化是分析激光毁伤机理的重要依据。激光与物质相互作用过程中常产生热辐射谱、激光等离子体谱和喇曼光谱,根据各种谱的产生机理,分析反演靶材温度信息,可为激光毁伤机理的研究奠定基础。

在研究脉冲强激光与物质相互作用过程中,激光作用于物质后所引起的激发谱的变化^[1-4]、宏观现象的变化^[5-9]以及作用区瞬态温度的变化^[10-12]等是分析激光毁伤物质机理的基础。激光辐照靶材产生的辐射谱主要包括热辐射谱^[13-14]、喇曼光谱^[2,12]、等离子体谱^[13,15-17]和自发辐射谱等^[18-20]。上述光谱可以通过光谱仪或其他通用设备直接获得。激光辐照靶材的宏观变化主要包括炸裂程度、烧蚀形貌、烧蚀喷溅粒子数密度、热应力引起的材料结构的变化以及毁伤深度等,激光毁伤区宏观现象的变化可以通过显微镜、X射线能谱仪、应力分析仪及台阶仪等通用设备测得。

目前,国内外在激光与物质相互作用机理的研究中,物质温度的表征主要采用静态分析、数学计算模拟^[21-26]以及通过分析引入的诱导激光束作用于靶材产生的激发谱等方法。朱卫东等人^[23]报道了利用宽带激光对陶瓷进行熔覆的温度场模拟;沈弘^[24]报道了激光钢板成型的温度场模拟;Shohei Chiashi 等人^[25]报道了利用功率为 2 mW,功率密度为 640 W/mm² 的 Ar⁺ 连续激光作用于碳纳米管,采用喇曼光谱实现其温度的测量; Brendan McCarthy 等人^[26]利用 532 nm 28 mW 的连续激光测试了原子力显微镜探针的温度;王俊德等人^[27]则利用光谱技术测量了燃烧和爆炸过程中瞬态温度。目前,利用激光激发热辐射谱作为分析作用区瞬态温度变化的实验研究正

在开展。本文用自制的光谱测量系统测量了强激光毁伤靶材过程的热辐射光谱,利用测得的辐射光谱反演出毁伤区的温度并计算得到了毁伤区的温度分布。文中的工作为深入研究激光损伤机理提供了借鉴。

2 理论基础

2.1 热辐射谱

任何温度高于 0 K 的物体均会产生热辐射谱,热辐射谱遵循普朗克定律。普朗克用量子概念推导出样品物体的光谱辐射出射度 $M_{\lambda T}$ 与波长 λ 、温度 T 的关系为^[28]:

$$M_{\lambda T} = \frac{2\pi hc^2 \varepsilon_0}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1}, \quad (1)$$

式中: $M_{\lambda T}$ 为样品的光谱辐射出射度,单位为 W/(m² · μm); T 为样品的绝对温度,单位为 K; $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J · s, 为普朗克常数; $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, 为玻尔兹曼常数; $c = 3 \times 10^8$ m/s, 为光速; ε_0 为样品的发射率,是与波长无关但与发射体特性密切相关,且 < 1 的常数。

令:

$$c_1 = 2\pi hc^2 = 3.741832 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2,$$

$$c_2 = \frac{hc}{k_B} = 1.438786 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

为第一辐射常数和第二辐射常数,则式(1)可写为:

$$M_{\lambda T} = \frac{\varepsilon_0 c_1}{\lambda^5 [\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1]}. \quad (2)$$

式(2)即为著名的普朗克公式,它给出了样品的光谱与温度的分布函数关系。图 1 为不同温度下 $M_{\lambda T}$ 与波长的 λ 的关系曲线,从图中曲线可以看出:

(1) $M_{\lambda T}$ 随 λ 连续变化,曲线只有一个极大值。

(2) 温度 T 越高, $M_{\lambda T}$ 也越大,不同温度的曲线不相交。曲线下的面积为该温度 T 下的总辐射出射度。

(3) 随着温度 T 的升高,辐射极大值所在的

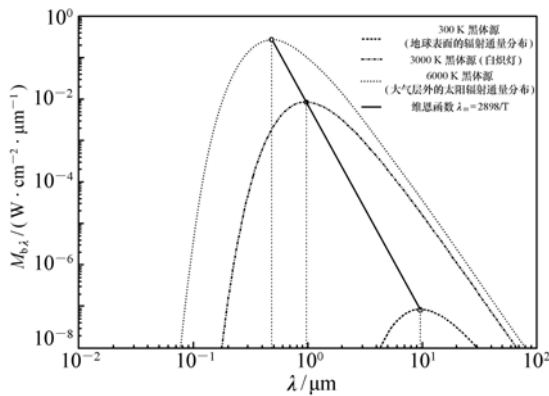


图1 黑体辐射能量分布曲线

Fig. 1 Radiation energy distribution curve by blackbody

波长 λ 向短波方向移动。

可见,只要测得强激光作用物质的热辐射谱,即可通过式(2)测得样品的热辐射温度 T 。

但对热辐射谱而言,并不是所有的热辐射谱都能够反演出激光毁伤靶材过程中的温度,在进行热辐射谱拟合过程中,还要考虑实际物体的光谱发射率。因此,在进行温度拟合时,要进行修正。

2.2 喇曼光谱

根据喇曼光谱量子理论可以得到斯托克斯和反斯托克斯喇曼谱线强度的公式为^[29-30]:

$$I_{\text{Stokes}} = b(\omega_0 - \Delta\omega)^4 \frac{\hbar}{2\Delta\omega} \cdot \alpha_{\beta\varphi,q}^2 (1 + \bar{n}_q), \quad (3)$$

$$I_{\text{Anti-Stokes}} = b(\omega_0 + \Delta\omega)^4 \frac{\hbar}{2\Delta\omega} \cdot \alpha_{\beta\varphi,q}^2 \bar{n}_q, \quad (4)$$

式中: ω_0 和 $\Delta\omega$ 分别是激发线频率和喇曼位移频率; $\hbar = h/2\pi$,其中 h 是普朗克常数; $\alpha_{\beta\varphi,q}$ 是电子极化率分量矩阵元,其中 β 、 φ 分别代表入射、散射光的偏振方向, q 是简正坐标的脚码; \bar{n}_q 是某一元激发 q 的平均布居数,若元激发是(热)声子,则它满足 Bose-Einstein 分布,即:

$$\bar{n}_q = \frac{1}{\exp(\hbar\Delta\omega/k_B T) - 1}, \quad (5)$$

式中: k_B 是玻尔兹曼常数, T 是样品的热力学绝对温度。由式(2)不难得到参与热激发的声子数为:

$$\bar{n}_q = \frac{k_B T}{\hbar\Delta\omega}. \quad (6)$$

将式(3)和式(4)做商,得:

$$R = \frac{I_{\text{Stokes}}}{I_{\text{Anti-Stokes}}} = \left(\frac{\omega_0 - \Delta\omega}{\omega_0 + \Delta\omega} \right)^4 \exp(\hbar\Delta\omega/k_B T). \quad (7)$$

这样,根据测得的斯托克斯和反斯托克斯谱的散射强度之比,便可确定样品的温度:

$$T = - \frac{\Delta\omega\hbar}{k_B} \ln(cR), \quad (8)$$

式中, c 为摄谱仪和检测系统的特征常数。

2.3 等离子谱

当脉冲强激光作用靶材时,由于高强度激光的强电场作用,样品局部表面将产生高温,当激光电场强度足够强时,样品表面将被汽化并产生等离子体。在热力学平衡态下,等离子体中分配在各激发态和基态的粒子数取决于玻耳兹曼分布。等离子体中的电子温度可以通过两条原子或离子分离谱线的相对强度来确定。

在热平衡条件下,单位体积的基态原子与激发态原子之间的分布遵循玻耳兹曼分布规律,即:

$$N_i = \frac{g_i}{g_0} N_0 \exp\left(-\frac{E}{KT}\right), \quad (9)$$

式中: N_i 与 N_0 为激发态和基态的粒子数密度, g_i 与 g_0 为激发态与基态的统计权重, E 为激发能, T 为激发温度。

如果考察同一种原子或离子发出的两条谱线,同时能级间粒子数满足玻耳兹曼分布,则:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_{i_1} \lambda_1}{A_2 g_{i_2} \lambda_2} \exp\left[-\frac{E_{i_1} - E_{i_2}}{KT}\right]. \quad (10)$$

所以等离子体的电子温度为:

$$T = - \frac{E_{i_1} - E_{i_2}}{K \cdot \ln\left(\frac{I_1 A_2 g_{i_2} \lambda_2}{I_2 A_1 g_{i_1} \lambda_1}\right)}. \quad (11)$$

这样,针对等离子体中的某原子或离子谱,查阅相关手册,获得跃迁几率和统计权重,只要测出相对谱线强度比值 I_1/I_2 ,即可确定等离子体的电子温度 T 。

3 实验

强激光毁伤过程的温度测量原理如图2所示。高能激光器发出的激光经过分束器1后,92%的透射能量经过会聚透镜1作用于靶材,8%

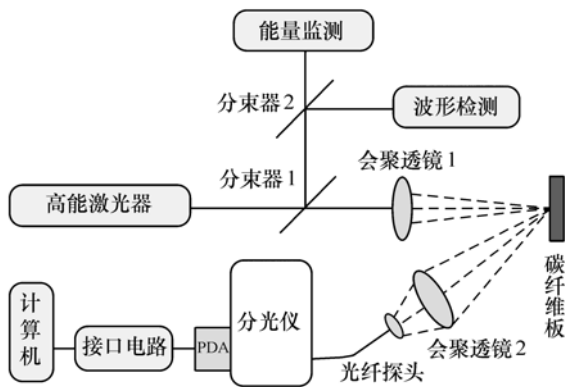


图2 强激光毁伤靶材的温度测量原理

Fig.2 Schematic diagram of temperature measurement for intense laser damage target

的反射能量照射到分束器2,分束器2再将其中8%的能量分出,用于波形监控,另外的92%用于激光能量的监测。强激光辐照到靶材上,引起靶材温度剧烈升高,同时产生激光维持的燃烧(LSCW),靶材上激光毁伤区的辐射经由汇聚透镜2接收,耦合到光纤中,经光纤传导到分光仪中,分光仪分出的不同波长的光信号照射到光电管阵列(PDA)上,光电管的位置代表着所接收到的波长,PDA的输出信息经由高速接口电路采集,传输到计算机中进行数据处理。

图3给出了实验过程中某时刻强激光毁伤照片,从图中可以看出,在强激光辐照下,靶材发生剧烈燃烧,产生激光维持燃烧波,伴随着燃烧产物的喷发现象,靶材及燃烧产物温度很高。



图3 强激光毁伤靶材照片

Fig.3 Photo of intense laser damage target

图4给出了实验过程中测得的靶材辐射谱随时间的变化曲线,从图中可以看出,随着时间的推移,辐射出射度不断增加,峰值波长向短波长方向移动,这表明随着激光加热时间的增加,靶材温度逐渐增加。

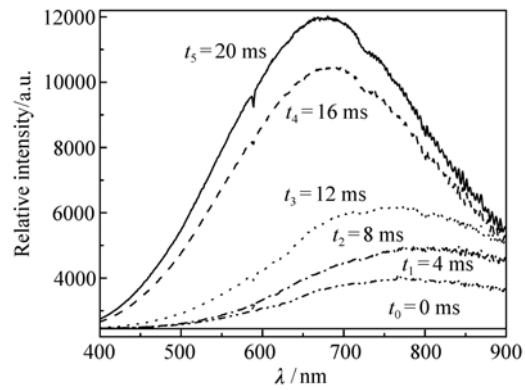


图4 实时采集的强激光毁伤靶材光谱

Fig.4 Real-time spectra of intense laser damage target

图5给出了在相同的激光照射条件下,10个样品的温度随时间的变化过程。从图中可以看出,实验的重复性很好。在强激光的照射下,靶材温度快速上升,达到最高值2420℃;然后,温度有所下降,产生这一现象的原因是靶材燃烧喷发物阻挡了入射强激光,使得靶功率密度下降,从而靶材温度下降;后期靶材燃烧所产生的喷发物耗尽,使得入射激光到靶功率密度恢复到初始值,加之靶材原有的温度积累,使得靶材温度上升到2460℃。

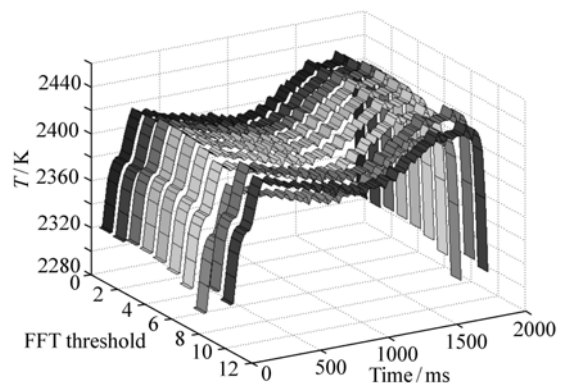


图5 强激光毁伤靶材温度变化过程

Fig.5 Diagram of temperature variation in intense laser damage targets

4 结 论

本文利用自制的高速光谱测量系统实时采集了毁伤过程中的辐射光谱,基于普朗克黑体辐射原理,反演获得了毁伤区的温度,并应用主成分回归算法,计算得到了毁伤区的温度分布,实现了强激光辐照靶材过程中瞬态温度和温度分布的测

量。由于激光光斑能量按照一定规律分布,靶材的温升在不同部位有所不同,实际的温度是一个温度范围。在本次试验中,实际的温度分布为 $2\ 360\sim 2\ 460\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中 $2\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所占比例较大。本文给出了瞬态温度及温度分布的光谱法测量与反演,该结果有助于深化激光与物质相互作用机理的研究。

参考文献:

- [1] DI PIAZZA A,FIORDILINO E,MITTLEMAN M. Analytical study of the spectrum emitted by a two-level atom driven by a strong laser pulse[J]. *Phys. Rev. A*,2001,64(1):013414.
- [2] PISCANEC S,FERRARI A C,CANTORO M,et al. . Raman spectrum of silicon nanowires[J]. *Materials Sci. Eng. :C*,2003,23(6-8):931-934.
- [3] POTVLIEGE R,VUCIC S. High-order above-threshold ionization of argon:plateau resonances and the floquet quasienergy spectrum[J]. *Phys. Rev. A*,2006,74(2):023412.
- [4] ZHAO Y,WANG Y,GONG H,et al. . Annealing effects on structure and laser-induced damage threshold of Ta₂O₅/SiO₂ dielectric mirrors[J]. *Appl. Surface Sci.*,2003,210(3-4):353-358.
- [5] LABUSCHAGNE K,PITYANA S. Laser induced damage threshold on metallic surfaces during laser cleaning[C]//proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, Germany, Jun 2005.
- [6] HE H,HU H,TANG Z,et al. . Laser-induced damage morphology of high-reflective optical coatings[J]. *Appl. Surface Sci.*,2005,241(3/4):442-448.
- [7] GAO W,ZHAN M,FAN S,et al. . Laser-induced damage of TaO/SiO narrow-band interference filters under different 1064 nm Nd:YAG laser modes[J]. *Appl. Surface Sci.*,2005,250(1-4):195-202.
- [8] ZHANG D,FAN S,ZHAO Y,et al. . High laser-induced damage threshold HfO films prepared by ion-assisted electron beam evaporation[J]. *Appl. Surface Sci.*,2005,243(1-4):232-237.
- [9] MATTHEWS M J,FEIT M D. Effect of random clustering on surface damage density estimates[J]. *SPIE*,2007,6720:67201J.
- [10] LD M D K. Temperature dependence of laser-induced bulk damage in SiO₂ and borosilicate glass[J]. *Phys. Rev. B*,1988,38(2):1473-1482.
- [11] LEE J,GOERICKE F,KING W. Temperature-dependent thermomechanical noise spectra of doped silicon microcantilevers[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*,2008,145-146:37-43.
- [12] MAVI H S,PRUSTY S,SHUKLA A K,et al. . Continuous wave laser-induced temperature rise in the thin films of silicon nanocrystals using Raman scattering[J]. *Thin Solid Films*,2003,45(12):90-96.
- [13] 刘丽炜,曲璐,谭勇,等. 脉冲激光作用单晶硅的等离子体光谱分析[J]. *强激光与粒子束*,2010,22(8):1815-1818. LIU L W,QU L,TAN Y,et al. . Plasma spectra analysis of pulse laser induce Si[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2010,22(8):1815-1818. (in Chinese)
- [14] 靳丽红,杨经国,哈元清,等. 脉冲激光激发 Cu 等离子体温度的玻耳兹曼方法测量研究[J]. *强激光与粒子束*,1999,11(6):710-714. JIN L H,YANG J G,HA Y Q,et al. . Measuring the temperature of the laser plasma with boltzmann distribution method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*,1999,11(6):710-714. (in Chinese)
- [15] XIA Z L,XUE Y Y,GUO P T,et al. . The plasma burst process in laser-induced films damage[J]. *Opt. Commun.*,2009,282(17):3583-3590.
- [16] NITIKANT,SHARMA A K. Plasma radiation during laser-induced breakdown of dielectrics[J]. *J. Appl. Phys.*,2003,

- 93(12):9968.
- [17] AHMED J B, FETHI F. Spectroscopic study of laser-induced plasma in aqueous media[J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(8):1607-1610.
- [18] 刘丽炜, 张喜和, 张凤东, 等. 激光能量对 Si 等离子体电子温度的影响[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(4):65-67.
LIU L W, ZHANG X H, ZHANG F D, *et al.*. The effect of electron temperature by laser energy[J]. *J. Changchun University Sci. Technol.* (Natural Science Edition), 2008, 31(4):65-67. (in Chinese)
- [19] 刘丽炜, 蔡红星, 李昌立, 等. ns 脉冲激光作用下 K9 玻璃的等离子体谱图研究[J]. 长春大学学报, 2008, 18(5):20-23.
LIU L W, CAI H X, LI C L, *et al.*. The plasma spectrum research on K9 glass under nanosecond pulse laser[J]. *J. Changchun University*, 2008, 18(5):20-23. (in Chinese)
- [20] 刘丽炜, 张喜和, 金光勇, 等. 激光作用下硅靶材的等离子体光谱强度分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2009, 25(2):240-245.
LIU L W, ZHANG X H, JIN G Y, *et al.*. The plasma spectrum research on Si under laser induced[J]. *J. Heilongjiang University of Business* (Natural Science Edition), 2009, 25(2):240-245. (in Chinese)
- [21] GNATYUK V A, AOKI T, HATANAKA Y. Mechanisms of laser-induced defect formation and in doping in CdTe crystals [J]. *IEEE Trans. on Nuclear Sci.*, 2004, 51(5):2466-2471.
- [22] GNATYUK V A. Mechanism of laser damage of transparent semiconductors[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2001, 308-310:935-938.
- [23] ZHU W D, LIU Q B, LI H T. A simulation model for the temperature field in bioceramic coating clad by wide-band laser[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(10):2673-2677.
- [24] SHEN H, YAO Z, SHI Y, *et al.*. The simulation of temperature field in the laser forming of steel plates[J]. *International J. Modelling, Identification and Control*, 2007, 2(3):241-249.
- [25] SHOHEI C, YOICHI M, YUHEI M, *et al.*. Temperature measurements of single-walled carbon nanotubes by Raman scattering[J]. *Thermal Eng.*, 1999, 7(4):10-11.
- [26] MCCARTHY B, ZHAO Y, GROVER R, *et al.*. Enhanced Raman scattering for temperature measurement of a laser-heated atomic force microscope tip[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(11):111914:1-3.
- [27] 周学铁, 王俊德, 李燕, 等. 现代光谱对燃烧与爆炸过程瞬态温度的实时诊断技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(2):407-410.
ZHOU X T, WANG J D, LI Y, *et al.*. Real time diagnostics of instantaneous temperature of combustion and explosion process by modern spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Anal.*, 2003, 23(2):407-410. (in Chinese)
- [28] 刘景生. 红外物理[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
LIU J S. *Infrared Physics*[M]. Beijing:National Defense Industrial Press, 1995. (in Chinese)
- [29] 杨序纲. 拉曼光谱的分析与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
YANG X G. *Raman Spectroscopy Analysis and Application*[M]. Beijing:National Defense Industrial Press, 2009. (in Chinese)
- [30] SMITH E, DENT G. *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*[M]. Texas:John Wiley & Sons, Ltd. 2005.

作者简介:蔡红星(1975—),男,陕西岐山人,博士,副教授,主要从事光谱测量与分析、激光与物质相互作用过程测量等方面的研究。E-mail:ciomsz@126.com

张喜和(1954—),男,吉林农安人,博士,教授,主要从事非线性光学、激光与物质相互作用等方面的研究。
E-mail:xihezhang@sina.com