

飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度*

王文亭¹⁾ 张楠¹⁾ 王明伟^{1)2)†} 何远航^{3)‡} 杨建军¹⁾ 朱晓农¹⁾

1) (南开大学现代光学研究所, 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

2) (光电材料与技术国家重点实验室, 中山大学, 广州 510275)

3) (爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京理工大学, 北京 100081)

(2013年5月18日收到; 2013年7月19日收到修改稿)

在明确飞秒激光与物质相互作用过程冲击温度概念的基础上, 讨论了飞秒激光烧蚀铝靶和铜靶过程中的冲击温度与其他物理量的关系, 利用飞秒激光烧蚀金属的双温模型提取了冲击温度的绝对值, 基于非傅里叶热传导模型计算了冲击温度的分布. 此项研究结果对飞秒激光安全加工含能材料有借鉴意义.

关键词: 飞秒激光, 含能材料, 烧蚀, 冲击温度

PACS: 06.60.Jn, 06.60.Vz, 05.45.Tp

DOI: 10.7498/aps.62.210601

1 引言

近年来, 随着飞秒激光技术的成熟与发展, 飞秒激光已广泛应用于微加工^[1]、无损检测^[2]、物质改性^[3]和材料表征^[4]等领域. 在飞秒激光微加工中, 飞秒激光与物质相互作用过程中的热效应一直被关注^[5,6]. 由于热效应持续时间极短且热传导为瞬间过程, 飞秒激光微加工的热效应不同于长脉冲激光加工的热效应. 已报道研究结果包括飞秒激光烧蚀铜靶过程中电子和光子耦合系数对金属表层电子温度影响^[7], 飞秒激光烧蚀镍靶热影响区域的计算^[8], 飞秒激光烧蚀硅靶的热融化与热传递现象的分析^[9], 脉冲激光烧蚀铝靶电声弛豫时间的计算^[10], 飞秒激光烧蚀铜靶过程中电子和晶格温度分布随时间和深度的演化规律^[11], 多脉冲激光烧蚀钢靶的热传导和热冲击特性^[12], 超短激光单脉冲烧蚀铜靶的烧蚀深度以及脉冲能量对烧蚀深度的影响^[13], 超短脉冲激光照射 50 nm 厚金过程中材料损伤的主要因素^[14], 瞬态非傅里叶热效应以及非傅里叶导热的作用范围^[15].

飞秒激光与靶材相互作用的加热过程是瞬间、阶跃式温升的超常规热传导过程. 该过程, 对应的温度瞬间改变为冲击温度. 冲击温度原本是爆炸物理学中描述冲击波的重要物理量, 瞬间阶跃热响应对应的温度为冲击温度^[16]. 相关研究包括: 在空间科学中, 利用三项式物态方程计算冲击温度, 模拟飞行碎片碰撞空间飞行器的冲击加热^[17]; 在高压物理学中, 利用三维动力学有限元程序模拟冲击压缩状态, 考虑热传导和热电子的情况下, 模拟得到铜和铝混合物的冲击温度^[18]和计算了铝、铜冲击温度的大小^[19], 采用辐射法测量了金属的冲击温度^[20]; 在热力学中, 利用光学高温计测量了 45 号钢在 230 GPa 左右的冲击压力下的冲击温度值^[21]. 以上所提到的冲击温度都是常规的热响应对应的温度, 温度的传播符合傅里叶热传导定律. 傅里叶热传导模型能够解决大多数的热传导问题, 但是超短超强脉冲与物质相互作用的加热过程为瞬间、阶跃的超常规的热传导问题, 此时傅里叶热传导模型不再适用. 为了正确地确定飞秒激光与物质相互作用的冲击温度及其传播规律, 采用双温模型确定冲击温度的绝对值, 再考虑非傅里叶效应^[12]对傅

* 强场激光物理国家重点实验室开放基金(中国科学院上海光学精密机械研究所)、光电材料与技术国家重点实验室开放基金(中山大学)、国家自然科学基金(批准号: 11174158, 61137001)和天津市自然科学基金重点项目(批准号: 12JCZDJC20200)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangmingwei@nankai.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: heyuanshang@bit.edu.cn

里叶热传导模型^[22]进行修正,以确定冲击温度的传播规律.

在飞秒激光加工领域,目前还没有关于飞秒激光烧蚀固体靶冲击温度的研究报道.本文明确了飞秒激光烧蚀金属靶过程中冲击温度的概念、分析其与其他物理量之间的关系,并且基于双温模型和非傅里叶导热模型提取飞秒激光烧蚀铝靶和铜靶中冲击温度的瞬态绝对值,分析了冲击温度的变化过程.此项研究结果对安全操控飞秒激光加工含能材料具有借鉴意义^[23].

2 飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度

2.1 双温模型

双温模型是 Anisimov 于 1974 年提出的,是超短激光脉冲与金属相互作用过程中热传导的理论模型^[24].在飞秒时间尺度,光子和电子以及电子和晶格之间的相互作用是两个分立的过程,该模型从一维非稳态热传导方程出发,分别列出电子和晶格温度变化微分方程.飞秒激光与金属相互作用的双温模型可以简化为^[25]

$$C_e(T_e) \frac{\partial}{\partial t} T_e = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - g(T_e - T_i) + A(x, t), \quad (1)$$

$$C_i \frac{\partial}{\partial t} T_i = g(T_e - T_i), \quad (2)$$

其中, $A(x, t)$ 代表飞秒激光相应热源项, g 为电子和晶格之间的耦合系数, κ_e 为电子的热传导率, $C_e(T_e)$ 和 C_i 分别为电子和晶格的比热, T_e 和 T_i 分别为电子和晶格系统的温度.

$$A(x, t) = \sqrt{\frac{4 \times \ln(2)}{\pi}} \frac{(1-R)J}{t_{FWHM}} \alpha \times \exp \left[-\alpha x - 4 \ln(2) \left(\frac{t - t_{FWHM}}{t_{FWHM}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

其中, x 代表光传播深度, J 代表入射飞秒脉冲能量密度, R 为金属反射率, α 为吸收系数, t_{FWHM} 为飞秒激光的半高全宽.

电子热导率的表达式为

$$\kappa_e = \chi \frac{(\mu_e^2 + 0.16)^{5/4} (\mu_e^2 + 0.44) \mu_e}{(\mu_e^2 + 0.092)^{1/2} (\mu_e^2 + \eta \mu_i)},$$

$\mu_e = T_e/T_F$ 和 $\mu_i = T_i/T_F$, 参数 χ 和 η 分别为和材料相关的常数.

2.2 非傅里叶热传导模型

当激光脉冲照射金属,吸收的激光脉冲导致金属局部温度增加,并因此在金属中产生热膨胀和热弹力波^[26].在超短脉冲激光作用下,固体热传导的非傅里叶效应变得尤为重要.由于温度和应变速率之间的耦合引起热弹力波的损耗,使热弹力波的机械能转换为物质内能.传统傅里叶热传导模型不能解决瞬态加热过程的热传导问题,故引入非傅里叶项;由于飞秒激光脉冲作用的时间内,垂直于靶材表面方向的温度梯度比平行于靶材表明方向的温度梯度大得多,因此飞秒激光照射金属靶的热传导过程可简化为一维热流问题.非傅里叶热传导模型为

$$t_0 \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

其中, $\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$ 为非傅里叶项, t_0 为靶材的热弛豫时间, a 为热扩散率, $a = \lambda/\rho \times c$, λ 为导热系数, ρ 为靶材的质量密度, c 为比热.

2.3 冲击温度的提取方法

飞秒激光轰击金属靶时会产生热冲击^[27],热冲击对应的温度为冲击温度.当激光脉冲轰击金属靶时,飞秒激光脉冲能量一部分被反射,一部分被吸收,吸收的激光能量转化为瞬间热能,靶材表面的热膨胀产生热弹力波,随后其传播到靶材内部,热弹力波的传播造成冲击温度的传播.

利用 Matlab 的偏微分 (partial differential equation, PDE) 模块中的 Pdepe 函数对双温方程数值求解,样品模型为一维半无限大固体靶即 $0 < x < +\infty$, $t > 0$, 双温模型的初始条件为 $T_i|_{t=0} = 300 \text{ K}$ 和 $T_e|_{t=0} = 300 \text{ K}$, 边界边界条件为 $T_i|_{x=+\infty} = 300 \text{ K}$ 和 $T_e|_{x=+\infty} = 300 \text{ K}$. 求解得到电子系统和晶格系统的温变过程,电子系统的温度瞬间达到的最大值即为冲击温度.利用双温模型模拟了电子和晶格温度的变化过程,定义了冲击温度,给出了冲击温度的绝对值,但是双温模型不能描述瞬态温度的传播过程,所以利用非傅里叶热传导模型模拟冲击温度的传播过程,这样一方面可以给出冲击温度的定性描述,另外一方面能给出冲击温度的定量结果.

利用有限差分法求解非傅里叶热传导模型,在飞秒脉冲作用的时间内,模型近似为一维热流问题,对半无限大固体靶进行加热时, $0 < x < +\infty$, $t > 0$. 非傅里叶热传导模型的边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=0} = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ q(t), & 0 < t < t_h, \text{ 和 } T|_{x=+\infty} = 300 \text{ K}, \\ 0, & t > t_h, \end{cases}$$

$$T|_{t=0} = 300 \text{ K}, \quad \partial T / \partial t|_{t=0} = 300 \text{ K}, \quad (5)$$

可推得温度分布表达式为 [12]

$$T(x, t) = T_1(x, t) - T_2(x, t) = T_1(x, t) - T_1(x, t - t_h) \varepsilon(t - t_h)$$

$$= \begin{cases} T_1(x, t), & 0 < t < t_h, \\ T_1(x, t) - T_2(x, t - t_h), & t \geq t_h, \end{cases} \quad (6)$$

$$T_1(x, t) = \begin{cases} 0, & t \leq x / \sqrt{t_0/a}, \\ \frac{1}{\lambda \sqrt{t_0}} \int_{x/\sqrt{t_0/a}}^t q(t-t') \cdot \exp\left(-\frac{t'}{2t_0}\right) \cdot I_0 \cdot \left(\frac{1}{2t_0} \times \sqrt{t'^2 - \frac{x^2 \times t_0}{a}}\right) dt', & t > x / \sqrt{t_0/a}, \end{cases} \quad (7)$$

式中, t_h 为热作用时间.

$$q(t) = \frac{q_0}{2} \left[\sin\left(t \frac{2\sqrt{\ln 2} \times \pi}{\tau_{FWHM}} - \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right], \quad (8)$$

其中, $q_0 = (1 - R)\alpha I_0^{[12]}$.

根据非傅里叶热传导模型计算的温度的变化即为冲击温度的变化, 因为传统傅里叶传导模型没有考虑热波的传播速度, 非傅里叶热传导模型增加了非傅里叶项, 可以计算瞬态热致温度的传播.

3 计算结果与讨论

3.1 飞秒激光烧蚀铝靶的冲击温度

铝靶参数 $g = 5.69 \times 10^{16} \text{ W/K}\cdot\text{m}^3$, $C_e = 135 \text{ J/K}\cdot\text{cm}^3$, $C_i = 2.46 \times 10^6 \text{ J/K}\cdot\text{cm}^3$, $R = 0.87$, $\alpha = 1/15 \times 10^{-9} \text{ nm}^{-1}$, $\chi = 238 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $\eta = 0.31$, $T_F = 7.38 \times 10^4 \text{ K}$. 飞秒激光参数 $t_{FWHM} = 50 \text{ fs}$, $J = 2 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$. 利用 Matlab 计算了 300 nm 深度的铝靶的电子温度分布和晶格温度分布, 步长为 0.1 nm, 计算 100 ps 内的电子和晶格温度变化, 时间步长为 10 fs. 图 1 给出了电子和晶格的温度变化过程. 由图 1(a) 可得, 电子的冲击温度达到 1200 K, 在 3 ps 时电子系统和晶格系统的温度达到平衡, 平衡时的温度达到 350 K; 由图 1(b) 可得电子系统和晶格系统的温度达到平衡之后, 温度值不再波动, 由于双温模型中并没有非傅里叶项, 故此时温度传播并没有表现出波动性.

图 2 给出 1 ps 后铝靶的电子和晶格温度沿光

传播深度的变化, 电子和晶格温度传播大约 200 nm 后电子和晶格达到稳定为室温. 图 3 给出电子和晶格的温度随传播深度和时间的分布.

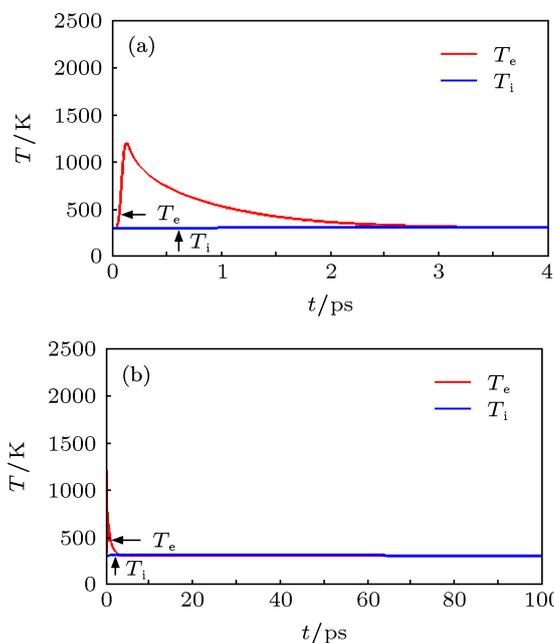


图 1 铝靶电子和晶格的温度

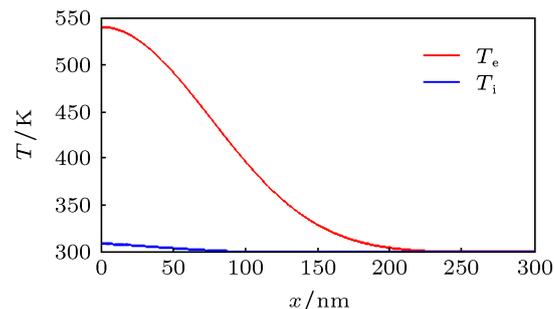


图 2 1 ps 后铝靶的电子和晶格温度与传播深度的关系

图 4 给出 50 fs 脉冲作用下, 电子和晶格温度随脉冲能量密度的变化. 由图可知, 对于给定靶材, 当脉宽一定时, 随着脉冲能量密度增加, 电子的冲击温度增加, 电子和晶格温度达到稳定所需的时间延长, 达到稳定时的温度值增加.

图 5 给出 2 J/cm² 脉冲作用下, 电子和晶格温度随脉冲宽度的变化. 由图可知, 对于给定靶材, 当激光能量密度一定时, 随脉冲宽度增加, 电子的冲击温度减小, 电子和晶格系统温度达到稳定所需的时间延长, 达到稳定的温度增加, 冲击温度的上升

时间延长.

图 6 给出 50 fs 脉冲作用下, 铝靶表面的冲击温度的时间和传播深度的分布, 由图可得对于给定的靶材, 当脉宽为 50 fs 时, 冲击温度周期性的变化, 并且随时间和传播深度的增加而减小. 冲击温度的周期性变化是由于飞秒激光脉冲与铝靶相互作用时, 光波转化为热弹力波, 热弹力波表现出波动性, 并且以振荡规律向前传播, 由于应力速率与温度之间耦合, 导致冲击温度向前传播, 所以冲击温度表现出波动性 [28-30].

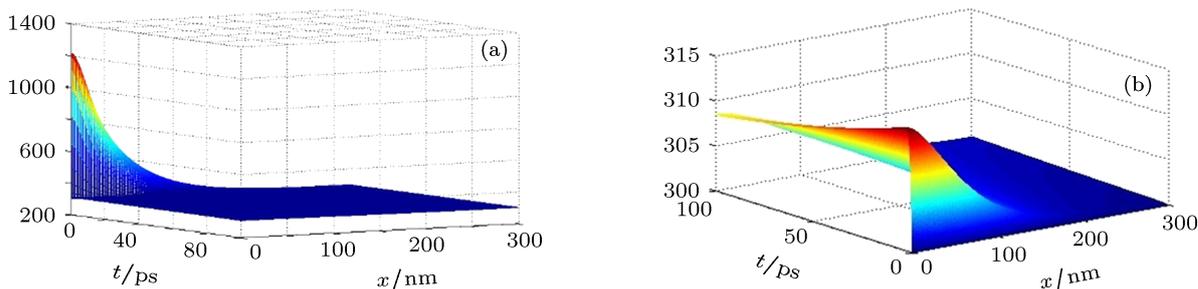


图 3 电子和晶格的温度分布 (a) 电子温度分布; (b) 晶格温度分布

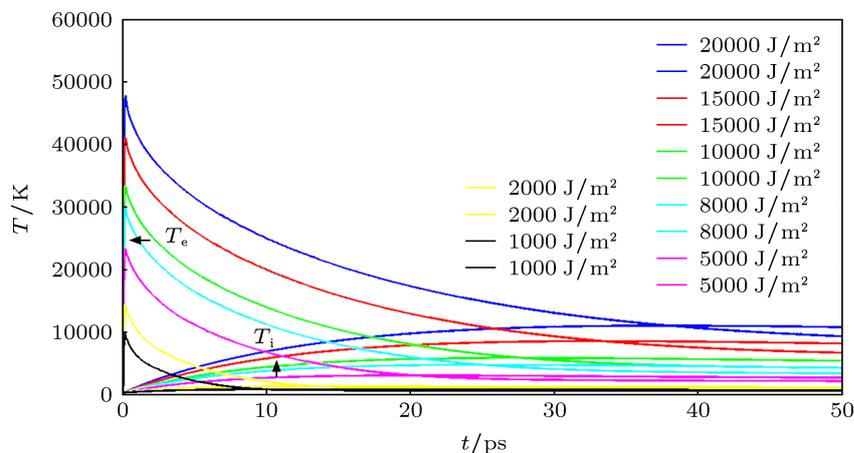


图 4 电子和晶格温度与激光能量密度的关系

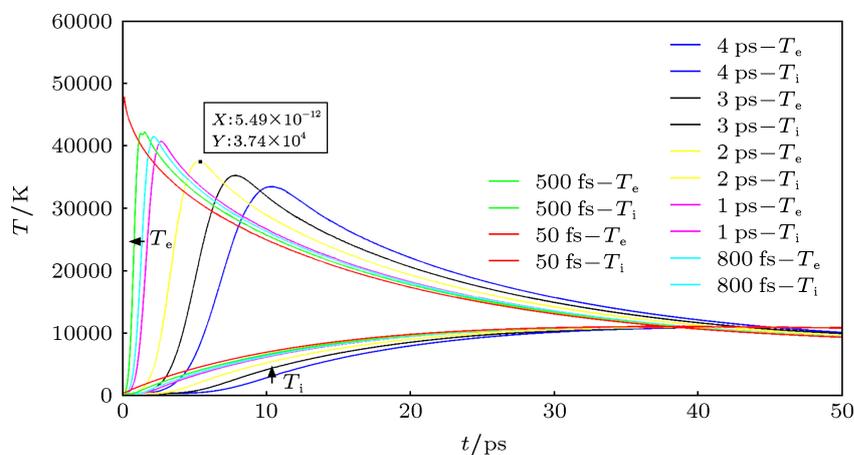


图 5 电子和晶格的温度与脉冲宽度的关系

3.2 飞秒激光烧蚀铜靶的冲击温度

铜靶参数 $g = 1.02 \times 10^{17} \text{ W/K}\cdot\text{m}^3$, $C_e = 135 \text{ J/K}\cdot\text{cm}^3$, $C_i = 3.5 \times 10^6 \text{ J/K}\cdot\text{cm}^3$, $R = 0.6$, $\alpha = 1/14.2 \times 10^{-9} \text{ nm}^{-1}$, $\chi = 377 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $\eta = 0.139$, $T_F = 8.12 \times 10^4 \text{ K}$. 飞秒激光参数: $t_{\text{FWHM}} = 50 \text{ fs}$, $J = 2 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$. 利用 Matlab 计算了 300 nm 厚的铜靶的电子温度分布和晶格温度分布, 步长为 0.1 nm, 计算 100 ps 内的电子和晶格温度变化, 时间步长为 10 fs. 图 7 给出了电子和晶格系统的温度变化过程. 由图 7(a) 可得, 电子的冲击温度达到 1850 K, 在 1.6 ps 时电子系统和晶格系统

的温度达到平衡, 平衡时的温度达到 310 K; 由图 7(b) 可得电子系统和晶格系统的温度达到平衡之后, 温度值不再波动. 铜靶和铝靶不同的冲击温度, 是由于铜的反射率小于铝靶的反射率, 铜的电子比热容小于铝的电子比热容; 铜靶的晶格比热容大于铝靶的晶格比热容, 故电子系统和晶格系统达到平衡时, 铜靶的温度小于铝靶的温度.

图 8 给出 1 ps 后铜靶的电子和晶格温度沿光传播深度的变化, 电子和晶格温度传播大约 420 nm 后电子和晶格的温度达到平衡为室温. 图 9 给出铜靶电子和晶格的温度随传播深度和时间的分布.

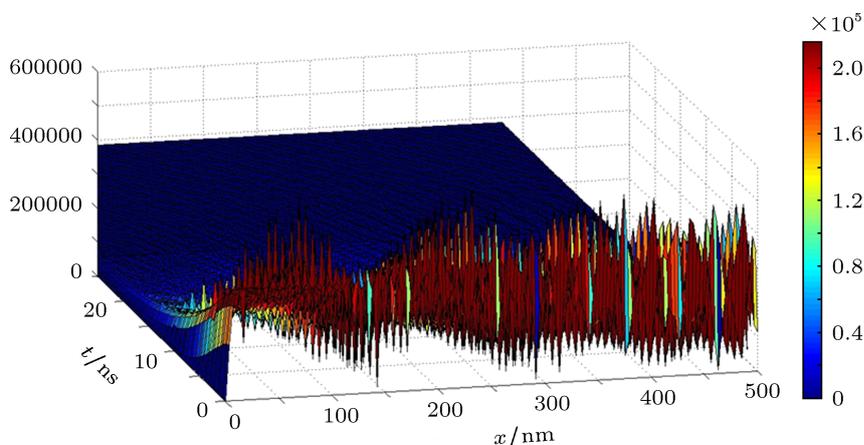


图 6 冲击温度随空间和传播深度的变化

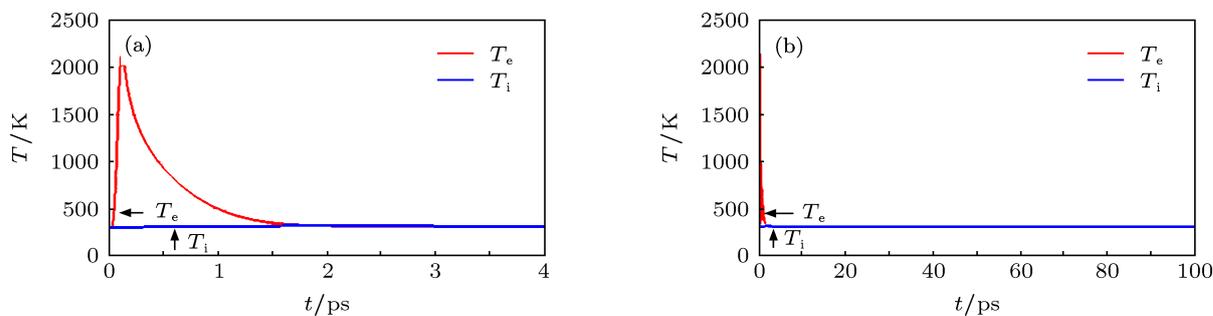


图 7 铜靶电子和晶格温度

图 10 给出 50 fs 脉冲作用下, 电子和晶格温度随脉冲能流密度的变化. 由图可知, 对于给定靶材, 当脉宽一定时, 随脉冲的能量密度增加, 电子冲击温度增加, 电子和晶格温度达到稳定的时间延长, 达到稳定的温度值增加.

图 11 给出 2 J/cm^2 脉冲作用下, 电子和晶格温度随脉冲宽度的变化. 由图可知, 对于给定靶材, 当激光能量密度一定时, 随脉冲宽度增加, 电子的冲击温度减小, 电子和晶格系统温度达到稳定所需的时间延长, 达到稳定的温度增加, 冲击温度的上升

时间延长.

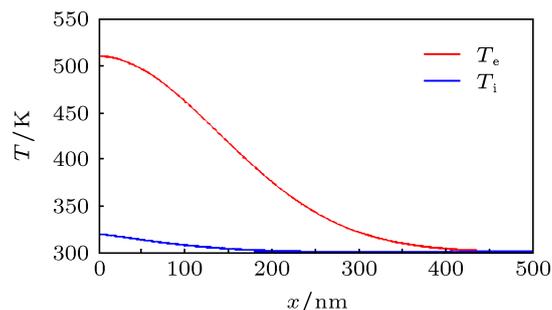


图 8 1 ps 后铜靶的电子和晶格温度与传播深度的关系

图 12 给出 50 fs 脉冲作用下, 铜靶表面冲击温度的时间和空间的分布, 由图可知, 对于给定的靶材, 一定能量密度的激光, 冲击温度周期性的变化, 并且随时间和传播深度的增加而减小.

3.3 讨论

由图 1(a) 和图 7(a) 可知, 在 50 fs, $2 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 激光脉冲作用下, 铝靶的冲击温度为 1210 K, 铜靶的冲击温度为 2160 K; 铝靶达到温度

最大值需要的时间为 0.20 ps, 铜靶达到温度最大值需要的时间为 0.15 ps; 铝靶的电子和晶格达到温度平衡需要的时间为 2.6 ps, 铜靶的电子和晶格达到温度平衡需要的时间为 1.7 ps. 仿真结果表明, 冲击温度的大小与靶材表面反射率、靶材吸收系数以及电子的比热容有关, 当靶材反射率越小、靶材吸收越大以及电子比热容越小时, 冲击温度越大, 达到温度最大值需要的时间越短, 电子和晶格达到温度平衡需要的时间越长.

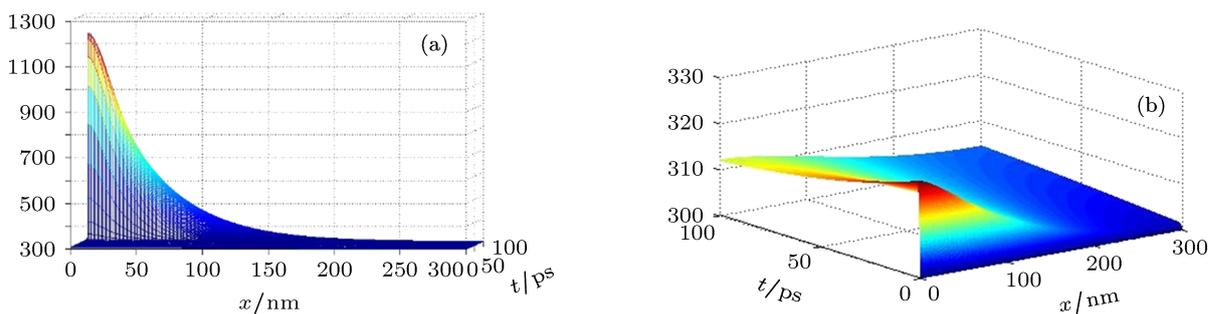


图 9 电子和晶格的温度分布 (a) 电子温度分布; (b) 晶格温度分布

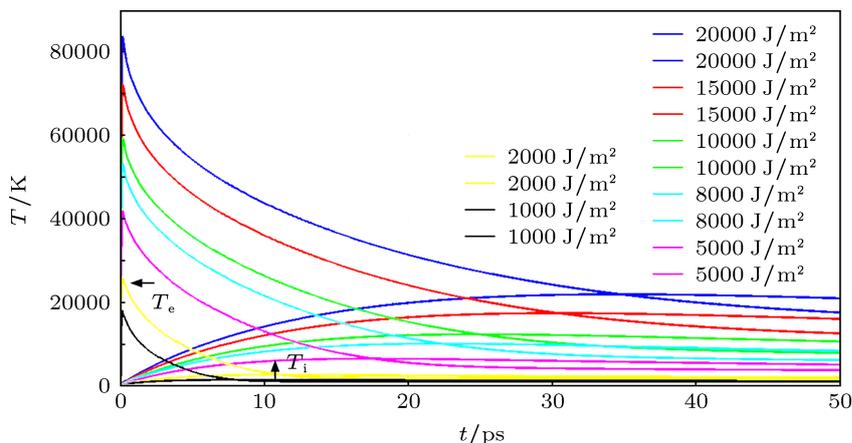


图 10 电子和晶格的温度与脉冲激光能量密度的关系

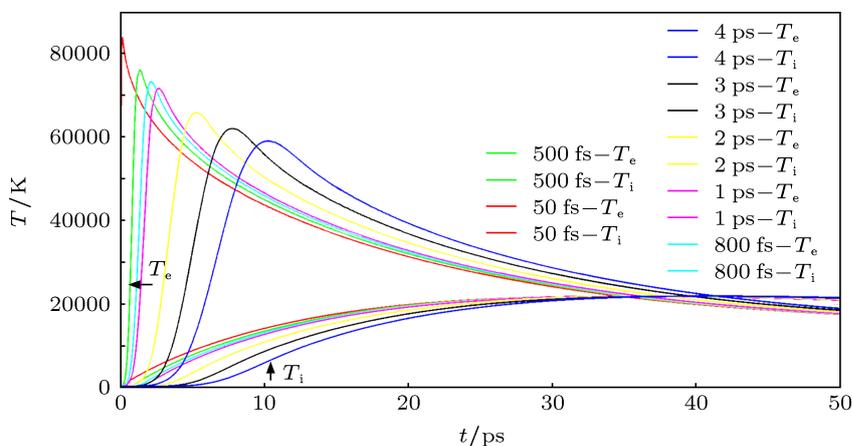


图 11 电子和晶格的温度与脉冲宽度的关系

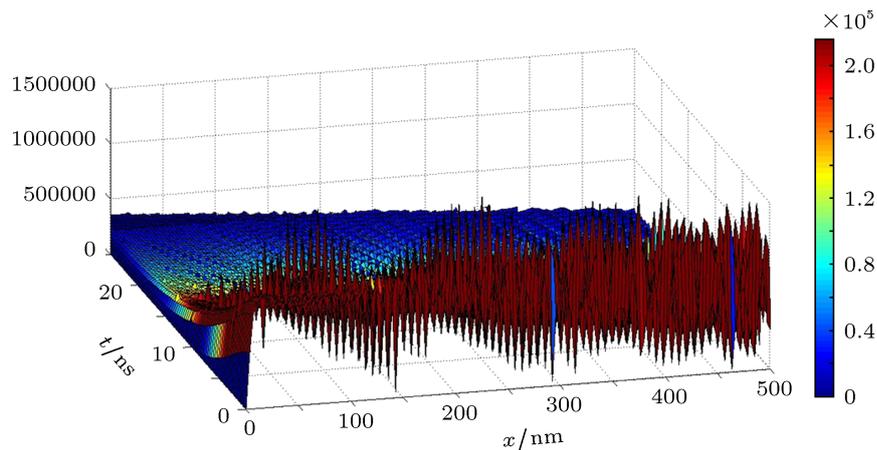


图 12 冲击温度随空间和时间的变化

由图 2 和图 8 可知, 在 50 fs , $2 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 激光脉冲作用下, 当时间为 1 ps 时, 铝靶电子和铜靶电子温度几乎相等为 540 K 左右, 但是铝靶电子和晶格达到平衡的所需要的传播深度 200 nm , 铜靶电子和晶格达到平衡所需要的传播深度约 420 nm , 这是由于铝靶电子的比热容大于铜靶电子的比热容所致.

由图 3(b) 和图 9(b) 可知, 铝靶晶格温度最大达到 350 K , 铜靶晶格温度最大达到 310 K , 这是由于铜靶的晶格比热容 ($3.5 \times 10^6 \text{ J/K}\cdot\text{cm}^3$) 略大于铝靶的晶格比热容 ($2.46 \times 10^6 \text{ J/K}\cdot\text{cm}^3$).

由图 4 和图 10 可知, 在脉冲宽度为 50 fs 时, 随着激光能量密度的增加, 铝靶和铜靶的冲击温度增加, 电子的温度冷却时间增加, 电子和晶格温度平衡时的温度也增加; 并且激光能量密度的增加不会影响电子温度的上升时间, 铝靶和铜靶的电子温度上升时间分别大约为 0.2 ps 和 0.15 ps . 在相同能量密度的情况下, 铜靶的冲击温度较铝靶的高.

由图 5 和图 11 可知, 当能量密度为 2 J/cm^2 时, 铝靶和铜靶的冲击温度随脉宽增加而减小, 电子的温度上升时间随脉宽增加而增加, 在脉宽为 4 ps 时, 电子温度的上升时间达到 10 ps , 电子和晶格稳定的温度随激光脉宽的增加而增加, 铝靶的电子和晶格稳定的温度小于铜靶电子和晶格稳定温度, 电子温度的冷却时间随激光脉宽的增加而减小, 这是由于冲击温度的减小导致 (对于同一种材料电子温度

的冷却速度不变); 当脉宽一定时, 铝靶的冲击温度小于铜靶的冲击温度; 由图 6 和图 12 可知, 对一定脉宽的飞秒激光脉冲, 铝靶和铜靶的冲击温度随位置的变化表现出波动性, 这是由于飞秒激光脉冲能量诱导热弹力波所致. 冲击温度的大小随传播深度的增加和时间的增加而减小. 对于同一色标标注下, 由二维色标图可知, 铝靶的冲击温度振荡较铜靶的剧烈.

4 结论

明确了飞秒激光烧蚀金属靶材过程中冲击温度的概念, 给出冲击温度的定义与计算方法. 利用飞秒脉冲激光烧蚀金属的双温模型以及非傅里叶热传导模型, 算得飞秒激光烧蚀铝靶和铜的冲击温度以及冲击温度的分布. 在脉宽为 50 fs 和能量密度为 $2 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 的激光脉冲作用下, 铝靶和铜靶的冲击温度分别为 1210 K 和 2160 K . 计算结果表明, 铝靶和铜靶的冲击温度的传播表现出波动性, 并且铝靶的冲击温度振荡较铜靶的剧烈. 分析表明, 靶材的表面反射率、吸收系数以及电子比热容等材料参数是影响冲击温度大小的根本原因. 对于给定靶材, 冲击温度随激光能量密度的增加而增加, 随脉宽的增加而减小.

飞秒激光烧蚀固体靶冲击温度绝对值的确定, 对安全操控飞秒激光加工含能材料具有重要意义.

- [1] Pronko P P, Dutta S K, Squier J 1995 *Opt. Comm* **114**
- [2] Bonello B, Perrin B, Rpmatet E 1997 *Ultrasonics* **35**
- [3] Chen G F 2005 *Physics* 34 10(in Chinese) [陈国夫 2005 物理 **34** 10]
- [4] Morath C J, Maris H J, Cuomo J J 1994 *J. Appl. Phys.* **76**
- [5] Deng S H, Tao X Y, Liu M P, Zhou C Y 2007 *Laser Technology* **31** 1 (in Chinese) [邓素辉, 陶向阳, 刘明萍, 周彩玉 2007 激光技术 **31** 1]
- [6] Li M R, Hu H P 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 8 (in Chinese) [李名锐, 胡汉平 2009 中国激光 **36** 8]
- [7] Ni X C, Wang Q Y 2004 *Chinese Journal of Lasers* **31** 3 (in Chinese) [倪晓昌, 王清月 2004 中国激光 **31** 3]
- [8] Wang Z J, Jia W, Liu M P, Ni X C 2007 *Laser Technology* **31** 6 (in Chinese) [王志军, 贾威, 倪晓昌 2007 激光技术 **31** 6]
- [9] Miao E M, Niu P C, Yan Y, Fei Y T 2011 *Transactions of the Chineses Society for Agricultural Machinery* **42** 4 (in Chinese) [苗恩铭, 牛鹏程, 颜焱, 费业泰 2011 农业机械学报 **42** 4]
- [10] Hu D Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2 (in Chinese) [胡德志 2009 物理学报 **58** 2]
- [11] Chen A M, Jiang Y F, Liu H 2012 *Laser & infrared* **42** 8 (in Chinese) [陈安民, 姜远飞, 刘航 2012 激光与红外 **42** 8]
- [12] Huang H M, Sun Y 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 6 (in Chinese) [黄海明, 孙岳 2009 强激光与粒子束 **21** 6]
- [13] Liang J G, Ni X C, Yang L 2005 *Chinese Journal of Lasers* **32** 9 (in Chinese) [梁建国, 倪晓昌, 杨丽 2005 中国激光 **32** 9]
- [14] Hao Q L, Qi W Z, Liu Q X 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 6 (in Chinese) [郝秋龙, 齐文宗, 刘全喜 2006 强激光与粒子束 **18** 6]
- [15] Yu N, Pan J S, Gu J F 2002 *Laser Technology* **26** 2 (in Chinese) [余宁, 潘健生, 顾剑锋 2002 激光技术 **26** 2]
- [16] Zhang B P, Zhang Q M, Huang F L 2001 *Detonation Physics* (Beijing: Ordnance Industry Press) p420 (in Chinese) [张宝坪, 张庆明, 黄风雷 2001 爆轰物理学 (北京: 兵器工业出版社) 第 420 页]
- [17] Tang W H, Zhang R Q 1997 *Chinese Space Science and Technology* **4** (in Chinese) [汤文辉, 张若棋 1997 中国空间科学技术 **4**]
- [18] Lin H L, Huang F L, Yu W R 2002 *Chineses Journal of High Pressure Physics* **16** 1 (in Chinese) [林华令, 黄风雷, 于万瑞 2002 高压物理学报 **16** 1]
- [19] Ran X W, Tang W H, Tan H 2006 *Chineses Journal of High Pressure Physics* **20** 2 (in Chinese) [冉宪文, 汤文辉, 谭华 2006 高压物理学报 **20** 2]
- [20] Dai C D, Tan H 2006 *Chineses Journal of High Pressure Physics* **20** 2 (in Chinese) [戴诚达, 谭华 2006 高压物理学报 **20** 2]
- [21] Tang W H, Hu J B, Jing F Q 1995 *Journal of National of Defense Technology* **17** 1 (in Chinese) [汤文辉, 胡金彪, 经福谦 1995 国防科技大学学报 **17** 1]
- [22] Zhang J Z 2009 *Higher Heat Transfer* (Beijing: Science Press) p75-85 (in Chinese) [张靖周 2009 高等传热学 (北京: 科学出版社) 第 75—85 页]
- [23] Wang W T, Hu B, Wang M W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 6 (in Chinese) [王文亭, 胡冰, 王明伟 2013 物理学报 **62** 6]
- [24] Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perelman T L 1974 *Sov. Phys. JETP* **39**
- [25] Ni X C 2003 *D. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [倪晓昌 2003 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [26] Wang X, Xu X 2000 *Appl. Phys. A* **73**
- [27] Galka A, Wojnar R 1995 *Jour. Therm Stress* **18**
- [28] Wang X M, Xu X F 2002 *Jour. Therm Stress* **25**
- [29] Zhu S C, Zhang J T, Qi L Y, C J B, Jiang X H, Liu S Y, Zheng Z J, Zhang B H, Ding Y K, Li C G, Wang D H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 9 (in Chinese) [朱森昌, 张家泰, 祁兰英, 陈家斌, 蒋小华, 刘慎业, 郑志坚, 张保汉, 丁永坤, 李朝光, 王大海 2002 物理学报 **51** 9]
- [30] Ma G H, Guo L J, Qian S X 2001 *Physics* **30** 06 (in Chinese) [马国宏, 郭立俊, 钱士雄 2002 物理 **30** 06]

Shock temperature of femtosecond laser ablation of solid target*

Wang Wen-Ting¹⁾ Zhang Nan¹⁾ Wang Ming-Wei^{1)2)†} He Yuan-Hang^{3)‡}
Yang Jian-Jun¹⁾ Zhu Xiao-Nong¹⁾

1) (*Institute of Modern Optics, Key Laboratory of Optical Information Science & Technology, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

2) (*National Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China*)

3) (*National Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

(Received 18 May 2013; revised manuscript received 19 July 2013)

Abstract

The concept of shock temperature in the interaction between femtosecond laser pulses and a solid target is defined. The relationship between the shock temperature and other physical parameters in the process of femtosecond laser ablation of aluminum and copper targets is discussed. Absolute values of shock temperature are calculated by means of a two-temperature model. Shock temperature is calculated distribution based on the non-Fourier heat conduction model. Result of this investigation plays an important role in the secure femtosecond laser processing of energetic materials.

Keywords: femtosecond laser, energetic material, ablation, shock temperature

PACS: 06.60.Jn, 06.60.Vz, 05.45.Tp

DOI: 10.7498/aps.62.210601

* Project supported by the Open Fund of State Key Laboratory of High Field Laser Physics of China (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics), the Open Fund of State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, China (Sun Yat-Sen University), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174158, 61137001), and the Tianjin Natural Science Foundation, China (Grant No. 12JCZDJC20200).

† Corresponding author. E-mail: wangmingwei@nankai.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: heyuanhang@bit.edu.cn