

纳米薄膜激光照射过程的格子波尔兹曼方法模拟

张珂¹ 李凌¹ 任松涛² 贾琼³

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093

²海南核电有限公司, 海南 昌江 572700

³辽宁调兵山煤矸石发电有限责任公司, 辽宁 调兵山 112700

摘要 考虑到激光加热过程中电子和晶格之间的不平衡传热特性, 将格子波尔兹曼方法(LBM)和双温度模型结合起来, 建立了 1 个两步 LBM 方程, 并用此方法对纳米薄膜在短脉冲激光照射过程中的热响应特性进行了模拟研究。分析了照射过程中薄膜内温度随时间及空间的变化规律; 探讨了激光强度以及薄膜厚度对金属薄膜热响应的影响。研究表明, 在照射过程中晶格温度的改变相对于电子温度的变化有明显的滞后效应, 并且计算得到的电子温度响应及破坏阈值和实验结果吻合较好, 说明所提出的两步 LBM 方程能够较好地描述激光照射过程中电子和晶格的不平衡传热现象。通过研究还发现, 随着激光能量的增强以及薄膜厚度的减小, 薄膜表面电子和晶格温度都有明显的升高, 且电子和晶格温度达到稳定的时间均有所延迟。

关键词 激光技术; 短脉冲激光; 纳米薄膜; 格子波尔兹曼方法; 双温度模型

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1014001

Simulation of Lattice Boltzmann Method for Nano-Film Laser Irradiation Process

Zhang Ke¹ Li Ling¹ Ren Songtao² Jia Qiong³

¹ School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

² Hainan Nuclear Power Limited Cooperation, Changjiang, Hainan 572700, China

³ Diaobingshan Liaoning Coal Gangue Power Generation Limited Liability Cooperation, Diaobingshan, Liaoning 112700, China

Abstract Considering the non-equilibrium heat transfer characteristics between electrons and lattices in the process of laser heating, a two-step lattice Boltzmann method (LBM) equation is established by combining the LBM and the two temperature model. Then the thermal response characteristic of a nano-film irradiated by the short-pulse laser is simulated using this method. The change law of temperature distribution in thin film with time and space is analyzed in the irradiation process. In addition, the effects of the laser intensity and the thin film thickness on the thermal response are also discussed. The results show that there exists a significant hysteresis phenomenon between the changes of the lattice temperature and the electron temperature in the irradiation process, and the calculated electron temperature response and damage thresholds are agree well with the experimental results. Those indicate that the proposed two-step LBM equation can describe the non-equilibrium heat transfer phenomenon between electrons and lattices in the process of the laser irradiation well. It is also found that with the enhancement of the laser energy and the decrease of the film thickness, the electron and lattice temperatures of the film surface are significantly increased, and the time at which the electron and the lattice temperature achieve stability are also delayed.

Key words laser technique; short-pulse laser; nano-film; lattice Boltzmann method; two temperature model

OCIS codes 140.7090; 310.6870; 320.2250

收稿日期: 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51476102)

作者简介: 张珂(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与物质作用过程中的格子波尔兹曼方法方面的研究。

E-mail: zhangke9011@163.com

导师简介: 李凌(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事微尺度传热方面的研究。

E-mail: lililing@usst.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

近年来,激光以其独特的加工特点受到人们的广泛关注和高度重视^[1]。随着激光科学技术的不断发展,其在金属材料加工领域的应用也越来越广泛^[2-3]。正是由于激光的高精密性,使其在照射金属材料过程中的工艺参数,比如温度、激光能量以及时间等参量对加工成型件的质量有很大影响,尤其是对微纳米尺度的材料。因此为了更好地控制和优化超快速激光金属材料的加工过程,对微尺度下激光加工过程的传热特性的研究非常重要。

当金属材料受到激光照射时,若激光脉冲的时间小于或相当于电子与声子的平衡时间,薄膜中电子与晶格便会存在非平衡现象^[4-5]。为了描述电子温度与晶格温度之间的非平衡效应,前苏联学者 Anisimov S I 等^[6]提出了电子-晶格双温度模型,并被广泛应用于模拟激光加热过程。许多文献中已经通过宏观或微观方法对该模型进行了研究。而近年来,格子波尔兹曼方法(LBM),作为一种新兴的介观数值模拟方法^[7],因其算法简单、编程容易、计算效率高、并行性好以及边界条件处理简单等优点,而被应用于传热问题的求解。其中 Jiaung W S 等^[8]应用 LBM 计算了固液相变的热传导型融化问题;Ho J R 等^[9-10]用 LBM 研究了非傅里叶导热问题;Mishra S C 等^[11]拓展了 LBM 的应用,将其应用到解决瞬态导热能量方程以及辐射导热问题当中。本文考虑了电子和晶格之间的不平衡传热,将 LBM 与双温度模型结合起来建立了 1 个两步 LBM 方程来对短脉冲激光照射金箔的传热现象进行描述。

2 两步 LBM 方程

在激光照射金属材料的过程中,热量的传递分两步进行,激光能量首先被电子吸收,然后通过碰撞将能量传给晶格和更深层的电子^[12]。所以,电子和晶格之间存在着不平衡传热。为了对此不平衡传热现象进行描述,Anisimov S I 等^[6]提出了双温度模型:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - G(T_e - T_l) + S, \quad (1)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) + G(T_e - T_l), \quad (2)$$

式中, t 是时间, T 为温度, x 为深度, G 为电子晶格耦合系数, k 为热传导率, C 为单位体积热容,下标 e 和 l 分别代表电子和晶格,激光的辐射作用被当作(1)式中的 S 来处理,其中所采用的激光为高斯型脉冲激光,且假设激光强度的空间分布是均匀的,则根据能量守恒,即:沉积在金属内部的总能量等于激光提供的能量,并通过适当的修正,便可得热源 S ^[13]:

$$S = 0.94 \frac{1 - R}{t_p (\delta + \delta_b) \{1 - \exp[-L/(\delta + \delta_b)]\}} J \exp\left[-\frac{L-x}{\delta + \delta_b} - 2.77 \left(\frac{t}{t_p}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中, R 代表表面反射率, L 代表金箔厚度, t_p 代表脉冲宽度, δ 和 δ_b 分别为光学穿透深度和电子碰撞深度。双温度模型中其他参数可以参考文献^[14]获得。

LBM 基于分子动力学,是 1 种通过对微观粒子行为的统计平均来反应其宏观动力学特征的方法,具有清晰的物理背景;同时,该方法在宏观上是离散的,在微观上是连续的,故而被称为介观方法^[7]。为了研究激光与金属薄膜相互作用过程中的非平衡传热现象,将介观的 LBM 与双温度模型结合起来建立 1 个两步 LBM 方程:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + \mathbf{c}_e \cdot \frac{\partial f_e}{\partial \mathbf{x}} = \Omega_{e-e} - \Omega_{e-l} + \frac{S}{C_e}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial f_l}{\partial t} + \mathbf{c}_l \cdot \frac{\partial f_l}{\partial \mathbf{x}} = \Omega_{l-l} + \Omega_{e-l}, \quad (5)$$

式中, f 为温度分布函数,其不仅是 LBM 的核心,也是该算法区别于其他模拟方法的地方, \mathbf{c} 为矢量,代表分布函数的迁移速度($|\mathbf{c}| = \Delta x / \Delta t$, Δx 和 Δt 分别代表格子步长和时间步长), Ω_{e-l} 代表电子与晶格之间的碰撞, Ω_{l-l} 和 Ω_{e-e} 分别代表晶格与晶格,以及电子与电子之间的碰撞; C_e 为电子热容; S 代表激光源项,其表达式与(3)式相同。

对于同种粒子(Ω_{e-e} 和 Ω_{l-1})间的碰撞,依然采用BGK(由Bhatnagar, Gross和Krook在1954年提出)假设^[7],即: $\Omega = -\frac{1}{\tau}(f - f^{eq})$,式中, f^{eq} 为平衡分布函数, τ 表示达到平衡分布 f^{eq} 所需的弛豫时间, τ 与宏观尺度的扩散系数 α ($\alpha = k/C$)有关, τ 与 α 间的关系可通过Chapman-Enskog展开(1种多尺度技术)得到。而对于不同粒子间的碰撞,则根据电子与晶格之间的散射效应,由文献[15]得到:

$$\Omega_{e-1} = \frac{2}{(2\pi)^3} \frac{m_e^2 U^2 (k_B T_D)^5}{h^7 \rho V_s^4} \left[\left(\frac{T_e}{T_D} \right)^5 \int_0^{T_D/T_e} \frac{\eta^4}{\exp(\eta) - 1} d\eta - \left(\frac{T_l}{T_D} \right)^5 \int_0^{T_D/T_l} \frac{\eta^4}{\exp(\eta) - 1} d\eta \right], \quad (6)$$

式中, k_B 是玻尔兹曼常数, $h = h/2\pi$ (h 为普朗克常数), U 为电子晶格之间相互作用的势能系数, ρ 代表材料的密度, T_D 为德拜温度, V_s 代表声速, η 代表积分算子, m_e 代表电子质量。

在较高的晶格温度下,即当 $T_l \gg T_D$ 时,(6)式可简化为^[16]:

$$\Omega_{e-1} = \frac{\pi^2 N m_e V_s^2}{6 C_l} \left[\frac{1}{\tau_e(T_e)} - \frac{1}{\tau_e(T_l)} \right], \quad (7)$$

$\tau_e(T_e)$ 、 $\tau_e(T_l)$ 分别代表温度为 T_e 和 T_l 时的弛豫时间,其表达式为:

$$\tau_e = \frac{1}{\omega_{e-e} + \omega_{e-1}}, \quad (8)$$

式中, ω_{e-1} 和 ω_{e-e} 分别代表电子与晶格以及电子与电子之间的碰撞频率,具体表达形式为:

$$\omega_{e-e} = \omega_{e,0} \left(\frac{T_F}{T_e} \right)^2, \quad (9)$$

$$\omega_{e-1} = \omega_{l,0} \frac{T_F}{T_l}, \quad (10)$$

式中, $m_e = 9.108 \times 10^{-31}$ kg, $N = 5.9 \times 10^{22}$ cm⁻³, $V_s = 1.9 \times 10^3$ ms⁻¹, $\omega_{e,0}$ 与 $\omega_{l,0}$ 代表相对应金属的常数, $\omega_{e,0} = 2.03 \times 10^{-17}$ s⁻¹, $\omega_{l,0} = 1.27 \times 10^{-16}$ s⁻¹, T_F 为费米温度 $T_F = 6.4 \times 10^4$ K。对两步LBM方程进行离散化:

$$[f_e(x + \Delta x, t + \Delta t) - f_e(x, t)] / \Delta t = \Omega_{e-e} - \Omega_{e-1} + \frac{S}{C_e}, \quad (11)$$

$$[f_l(x + \Delta x, t + \Delta t) - f_l(x, t)] / \Delta t = \Omega_{l-1} + \Omega_{e-1}, \quad (12)$$

方程的左边代表迁移过程,右边则代表碰撞过程和激光源项,对上述离散方程进行求解便可得所要求的结果。

3 两步LBM方程对激光照射纳米薄膜的模拟

采用上述两步LBM方程对脉冲激光照射纳米薄膜过程的传热现象进行了数值模拟和理论分析。模型所选材料为金,其物性参数见文献[13]。图1为物理模型:1束能流密度为 J ,脉冲宽度为 t_p 的激光照射在厚度为 L 的金箔表面。由于金箔的厚度相对于激光束的半径来说很小,因此,激光照射金属薄膜问题可以近似为一维问题。

假设初始温度为300 K,初始时间为 $-2t_p$,则该模型的初始条件为:

$$T_e(x, -2t_p) = T_l(x, -2t_p) = 300 \text{ K}, \quad (13)$$

激光照射过程中金箔的前后2个表面的热损失可以忽略,故可视为绝热^[17],上述方程的边界条件为:

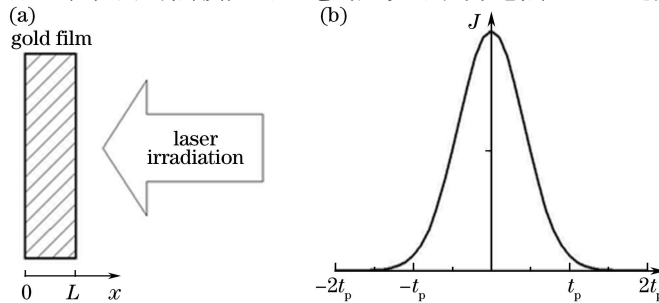


图1 物理模型。(a) 激光照射金箔薄膜;(b) 激光脉冲

Fig. 1 Physical model. (a) Laser irradiation on gold film; (b) laser pulse

$$\frac{\partial T_e}{\partial x} = \frac{\partial T_l}{\partial x} = 0, x = 0 \text{ 和 } x = L. \quad (14)$$

3.1 模拟结果和实验的对比

为了对程序进行验证,首先模拟了脉冲宽度和能流密度分别为 $t_p = 96 \text{ fs}$, $J = 10 \text{ J/m}^2$ 的激光照射 100 nm 厚的金箔中无量纲电子温度的变化,并将结果与文献[18]中的实验数据以及文献[19]中传统数值模拟结果[有限容积法(FVM)]进行了对比,对比结果如图 2 所示。其中,文献中的实验主要是通过抽运-探测热反射技术来测量材料前、后端面的反射率的变化率,从而间接地获得无量纲电子温度的变化情况。

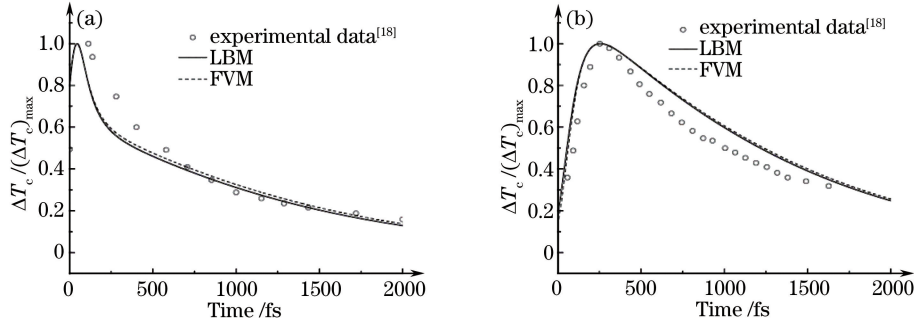


图 2 无量纲电子温度。(a) 前表面($x=100$); (b) 后表面($x=0$)

Fig. 2 Non-dimensional electron temperature. (a) Front surface ($x=100$); (b) rear surface ($x=0$)

图 2 所示即为激光照射金箔时,前、后表面的无量纲电子温度,其中圆点代表实验值,实线代表 LBM 数值模拟结果,从图中可以看出,2 者的曲线基本重合且与圆点的走势基本一致,说明该方法与传统数值模拟方法均能较好地捕捉电子温度的变化,从而验证了所采用模型程序的准确性。

进一步地,从破坏阈值的角度对该模型进行验证,为了得到破坏阈值,需要调节激光能流密度 J 使金箔前端的晶格温度恰好达到熔点温度(1336 K ^[13])。图 3 即为 $t_p = 600 \text{ fs}$ 的激光照射金箔时的破坏阈值。从图中可以看出,随着薄膜厚度 L 的增加,激光能流密度 J 的走势逐渐平缓,这表明在薄膜厚度不断增加的过程中,要达到破坏阈值,对应所需要增加的能流密度则不断减小。从图中还可以看出,破坏阈值模拟结果与文献[20]实验值基本吻合,进一步验证了两步 LBM 方程在研究激光加热金属材料过程的可靠性。

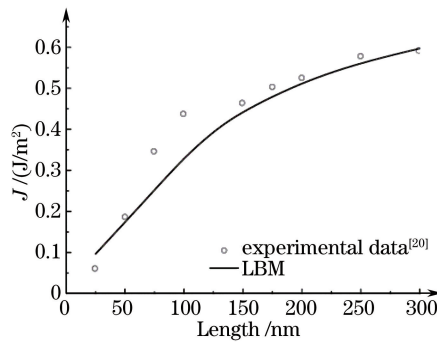


图 3 破坏阈值

Fig. 3 Damage threshold

3.2 激光照射过程温度的分布以及变化情况

模拟了脉宽为 40 fs 的短脉冲激光照射 500 nm 厚金膜时温度场的变化规律。图 4 给出了在能量密度为 $J = 1000 \text{ J/m}^2$ 的激光照射下,金膜前表面电子、晶格温度随时间的变化规律。从图中可以看出,在电子和晶格温度达到稳定前,同一时刻的电子和晶格的温差效应非常明显,这表明电子和晶格之间存在非平衡现象。同时,在电子温度达到峰值之后,电子与晶格之间的温差随着时间的推移逐渐减小,这是由于电子通过热传导及电子与晶格之间的相互作用分别向更深处电子和晶格传递能量,导致电子温度下降,晶格温度升高,并最终达到稳定状态。从图中还可以看出,电子温度在很短的时间内到达峰值,这是因为电子的质量热容非常小,而电子间的热导率非常大,所以电子的温升速率特别快,在极短时间便可达到最大值,而在同样的

时间内晶格的温度却变化不大,这也进一步说明了电子和晶格之间的非平衡效应。

图 5 揭示了在 $L=500$ nm 的金膜中,不同深度处电子的温度分布规律。从图中可以看出,电子空间温度分布曲线沿激光照射方向依次降低,但其变化趋势非常相近,这表明激光照射作用对不同位置处的电子温度的影响一致,但其影响随着照射方向不断减弱。同时,从图中还可以看出,峰值电子温度以及电子温度梯度均沿着激光照射方向逐渐减小,在前表面及其附近位置,电子的温升非常快,而越接近后表面则电子的温升速率越低,这是因为在前表面附近温升主要靠激光辐照的影响,而在靠近后表面位置激光辐照作用减弱,热传导效应增强。

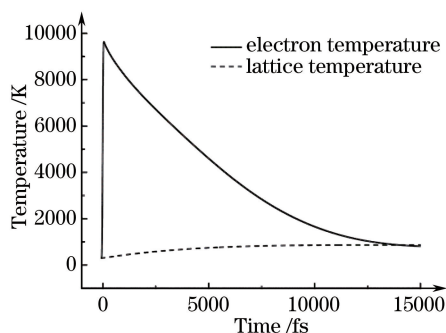


图 4 金膜前表面电子及晶格温度随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of electron temperature and lattice temperature changing with time on gold film front surface

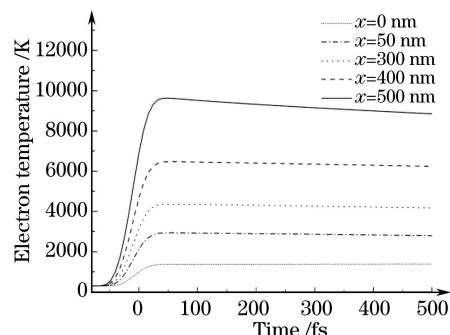


图 5 金膜内不同位置处电子温度随时间的变化曲线

Fig. 5 Curves of electron temperature changing with time at different gold film locations

图 6 分析了不同延迟时间下薄膜内温度的空间分布。从图中可以看出,在 0 ps 时(初始时刻为 -80 fs),晶格的温度基本保持不变,而在相同时刻电子的温度已经有了明显的变化,这表明在金箔内晶格温度的传递具有一定的滞后性。同时,电子温度在 0~3 ps 这段时间内经历了温度由升高到降低的过程,而晶格温度在 0~13.75 ps 时间内温度却是一直在升高的,这也充分说明了电子和晶格之间存在非平衡传热现象。从图中还可以看出,电子和晶格空间温度分布有 1 个共同点,就是随着时间的推移,前表面温度的变化均会经历 1 个由不断升高到逐渐降低的过程。

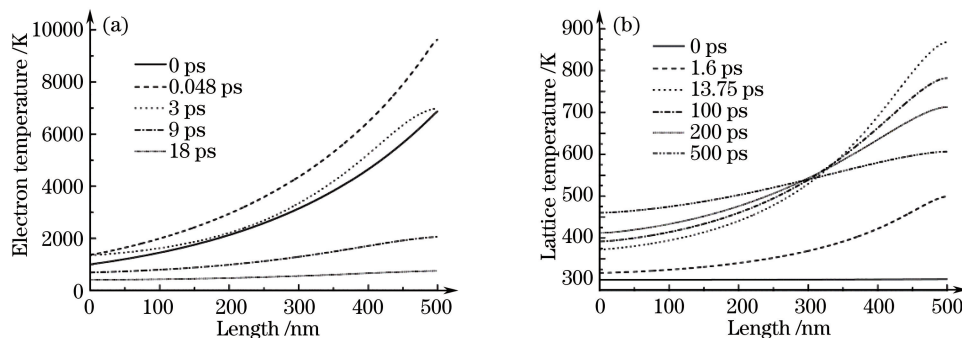


图 6 薄膜内温度的空间分布随时间的变化。(a) 电子温度; (b) 晶格温度

Fig. 6 Spatial temperature distribution in gold thin film at different time. (a) Electron temperature; (b) lattice temperature

3.3 参数对传热过程的影响

图 7 展示了不同厚度的金膜在相同的照射条件下,前表面电子和晶格温度随着时间的变化曲线。从图中可以看出,随着薄膜厚度的减小,薄膜表面电子和晶格温度都有明显升高。从微观角度分析,这是因为随着厚度的减小,电子和声子在垂直于薄膜表面方向上与薄膜表面的碰撞明显增多,从而引起薄膜温度的升高。

图 8 给出了不同能量密度对前表面电子温度和晶格温度的影响。对比图 7 可以看出,图 8 和图 7 中对应温度变化趋势一致,随着脉冲能量的增加,电子和晶格温度的变化与图 7 中随着薄膜厚度减小的变化趋势保持一致,这表明在脉冲能量或者薄膜厚度仅有 1 个量发生变化的情况下,强化脉冲能量与减小薄膜厚度的模拟结果等效。

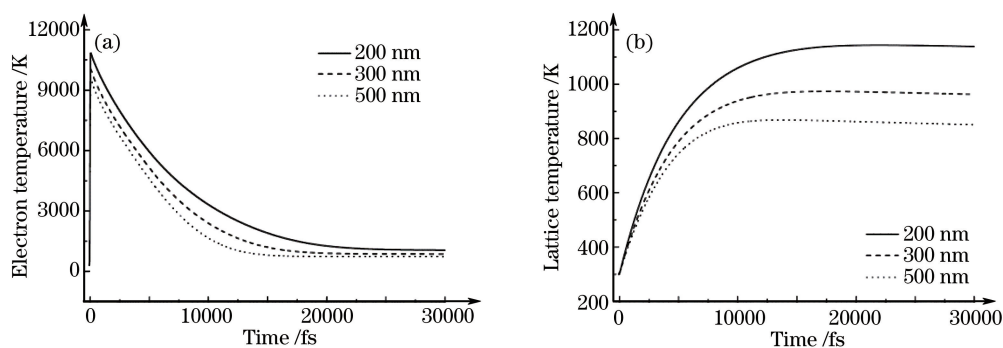


图 7 不同厚度薄膜前表面温度随时间的变化。(a) 电子温度；(b) 晶格温度

Fig. 7 Front surface temperature changes with time for different film thicknesses. (a) Electron temperature; (b) lattice temperature

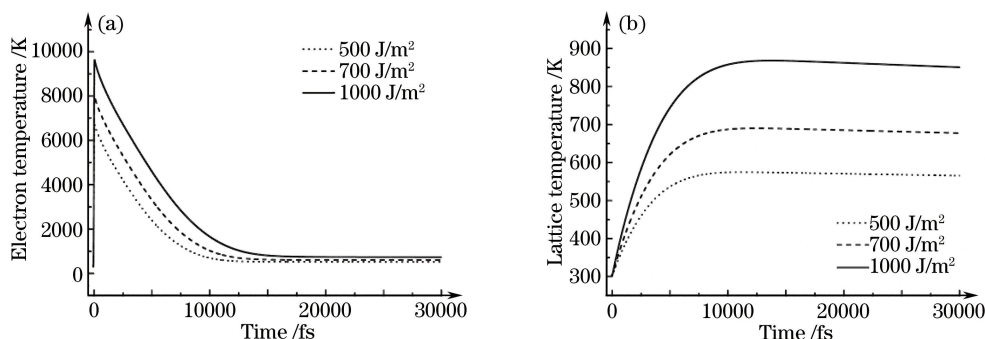


图 8 脉冲能量不同时金箔前表面温度随时间的变化规律。(a) 电子温度；(b) 晶格温度

Fig. 8 Temperature of gold film front surface varies with time for different pulse energies. (a) Electron temperature; (b) lattice temperature

4 结 论

结合 LBM 和双温度模型建立了 1 个两步 LBM 方程,对激光照射金纳米薄膜的传热过程进行了模拟研究,分析讨论了不同参数对传热过程的影响。得到结论如下:

1) 模拟所得到的电子温度响应和破坏阈值和实验结果吻合较好,说明所提出的两步 LBM 方程能够较好地描述激光照射过程中电子和晶格的不平衡传热现象;

2) 在照射过程中表层电子温升速度非常快,而晶格的温度变化则有明显的滞后效应;并且随着激光能量的增强以及薄膜厚度的减小,薄膜表面电子和晶格温度都有明显的升高,且电子和晶格温度达到稳定的时间均有所延迟。

参 考 文 献

- 1 Chryssolouris G. Laser machining: theory and practice[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- 2 Wang Haozhu, Yang Fenghe, Yang Fan, *et al.* Investigation of femtosecond-laser induced periodic surface structure on molybdenum[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0103001.
王浩竹, 杨丰赫, 杨帆, 等. 飞秒激光在金属钼表面诱导产生纳米量级周期条纹结构的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103001.
- 3 Dai Wei, Zheng Zhizhen, Li Jianjun, *et al.* Research progress of laser polishing on the metal surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110001.
戴伟, 郑志镇, 李建军, 等. 金属材料表面的激光抛光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110001.
- 4 Chen J K, Latham W P, Beraun J E. The role of electron phonon coupling in ultrafast laser heating[J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 63-68.
- 5 Zhao Shiqiang, Li Ling. Numerical investigation of phase change during thermal ablation of gold films induced by

- femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1214001.
- 赵士强, 李 凌. 飞秒脉冲激光烧蚀金膜的相变传热研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1214001.
- 6 Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perelman T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses [J]. *Zh Eksp Teor Fiz*, 1974, 39: 375-377.
 - 7 He Yaling, Li Qing, Wang Yong, *et al.* Lattice Boltzmann method and its applications in engineering thermophysics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(18): 2638-2656.
何雅玲, 李 庆, 王 勇, 等. 格子 Boltzmann 方法的工程热物理应用[J]. *科学通报*, 2009, 54 (18): 2638-2656.
 - 8 Jiaung W S, Ho J R, Kuo C P. Lattice Boltzmann method for the heat conduction problem with phase change [J]. *Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals*, 2001, 39(2): 167-187.
 - 9 Ho J R, Kuo C P, Jiaung W S. Study of heat transfer in multilayered structure within the framework of dual-phase-lag heat conduction model using lattice Boltzmann method [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46 (1): 55-69.
 - 10 Ho J R, Kuo C P, Jiaung W S, *et al.* Lattice Boltzmann scheme for hyperbolic heat conduction equation [J]. *Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals*, 2002, 41(6): 591-607.
 - 11 Mishra S C, Lankadasu A. Transient conduction-radiation heat transfer in participating media using the lattice Boltzmann method and the discrete transfer method [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2005, 47(9): 935-954.
 - 12 Yang Qing, Du Guangqing, Chen Feng, *et al.* Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shaped femtosecond laser pulses [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0502005.
杨 青, 杜广庆, 陈 烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性 [J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502005.
 - 13 Zhang Y W, Chen J K. An interfacial tracking method for ultrashort pulse laser melting and resolidification of a thin metal film [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2008, 130(6): 062401.
 - 14 Shao Junfeng, Guo Jin, Wang Tingfeng. Thermal behavior of metal thin film irradiated by femtosecond double-pulse laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 091017.
邵俊峰, 郭 劲, 王挺峰. 飞秒双脉冲激光照射金属薄膜的热行为 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 091017.
 - 15 Kaganov M I, Lifshitz I M, Tanatarov L V. Relaxation between electrons and crystalline lattices [J]. *Sov Phys JETP*, 1957, 4: 173-178.
 - 16 Chen J K, Latham W P, Beraun J E. The role of electron-phonon coupling in ultrafast laser heating [J]. *J Laser Application*, 2005, 17(1): 63-68.
 - 17 Wang Haidong, Ma Weigang, Guo Zengyuan, *et al.* Experimental study of ultra-fast heat conduction process in metals using femtosecond laser thermal reflection method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(3): 465-468.
王海东, 马维刚, 过增元, 等. 飞秒激光热反射实验系统测量金属薄膜中的超快速热传递过程 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(3): 465-468.
 - 18 Qiu T Q, Tien C L. Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1993, 115(4): 835-841.
 - 19 Li L, Zhou L, Shan Y G, *et al.* Investigation on heat transfer mechanism of ultrashort laser interaction with metals [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 36(1): 183-203.
 - 20 Stuart B C, Feit M D, Herman S, *et al.* Optical ablation by high-power short-pulse lasers [J]. *J Opt Soc Am B*, 1996, 13 (2): 459-468.