

## 多脉冲飞秒激光烧蚀金属箔的热电子发射数值分析

徐斌<sup>1</sup> 伍晓宇<sup>1</sup> 凌世全<sup>1</sup> 罗烽<sup>1</sup> 杜晨林<sup>2</sup> 孙秀泉<sup>2</sup><sup>1</sup>深圳大学机电与控制工程学院, 深圳市模具先进制造技术重点实验室, 广东 深圳 518060<sup>2</sup>深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060

**摘要** 通过双温模型(TTM)结合 Richardson-Dushman 方程对多脉冲飞秒激光烧蚀铜箔的热电子发射以及温度场进行了数值模拟。在模拟的过程中充分考虑了随着飞秒激光脉冲个数的改变,铜箔对飞秒激光的反射率、表面吸收率和表面吸收系数的变化等因素,部分改写了飞秒激光光源项,从而实现了多脉冲飞秒激光烧蚀铜箔的热电子发射和温度场的动态数值模拟。数值模拟发现,随着脉冲个数的增加和脉冲间隔的减小,铜箔表面的反射率和表面吸收系数将明显减小,表面吸收率将明显增大,这一变化对铜箔的电子发射以及多脉冲飞秒激光照射下铜箔的温度场具有重要影响;而随着距铜箔表面深度的增加,这些影响将逐渐减小。

**关键词** 超快光学;飞秒激光烧蚀;多脉冲;铜箔;双温模型;Richardson-Dushman 方程;热电子发射

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.083201

## Numerical Simulation of Thermal Electron Emission in Metal Films Ablated by Multi-Pulse Femtosecond Laser

Xu Bin<sup>1</sup> Wu Xiaoyu<sup>1</sup> Ling Shiquan<sup>1</sup> Luo Feng<sup>1</sup> Du Chenlin<sup>2</sup> Sun Xiuquan<sup>2</sup><sup>1</sup>Shenzhen Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Mold and Die, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China<sup>2</sup>Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** The characteristics of thermal electron emission of the metal films ablated by multi-pulse femtosecond laser are investigated using the two-temperature model (TTM) coupled with the Richardson-Dushman equation. In the numerical simulation, the variations of reflectivity and absorption of metal films with the change of the number of femtosecond laser pulses and pulse spacing are considered and the dynamic numerical simulation is achieved. It is found that, with the change of femtosecond laser pulse number and pulse spacing, the reflectivity and absorption coefficient of metal films would be raised and the absorptivity would be decreased. And the change of the parameters would have a significant influence on the thermal electron emission and the temperature field of metal films. Meanwhile, with the depth raising, the influence would be diminished.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond laser ablation; multi-pulse; copper film; two-temperature model; Richardson-Dushman equation; thermal electron emission

**OCIS codes** 320.2250; 220.4000

## 1 引言

飞秒激光以其能量密度高、烧蚀阈值确定、热影响区小、加工材料广泛等优点被广泛地应用于微细加工

收稿日期: 2012-03-31; 收到修改稿日期: 2012-05-03; 网络出版日期: 2012-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51175348)、深港创新圈计划(ZYB200907090135A)和广东省教育厅重点实验室开放基金(201002)资助课题。

作者简介: 徐斌(1985—),男,博士研究生,主要从事激光与物质的相互作用和精密加工方面的研究。

E-mail: xubin\_szu@163.com

导师简介: 伍晓宇(1963—),男,教授,主要从事激光快速成型和微制造方面的研究。

E-mail: wuxy@szu.edu.cn(通信联系人)

领域,与此同时,国内外许多学者对飞秒激光与物质的相互作用机理展开了广泛的研究。前苏联学者 Anisimov 等<sup>[1]</sup>以一维非稳态热传导方程为基础提出了双温模型(TTM),该模型用于描述超短激光脉冲烧蚀金属时电子和晶格的温度场的变化。Qiu 等<sup>[2]</sup>以玻尔兹曼方程为基础,提出了双温两步热传导模型,该模型用于描述超短激光脉冲与金属作用时的非平衡加热过程。许多学者以上述研究为基础对飞秒激光烧蚀不同材料的物理过程进行了数值模拟并取得了较大的进展<sup>[3~5]</sup>。通过上述研究,超短激光脉冲烧蚀金属箔的过程中,电子和晶格温度将处于非平衡状态,并且电子的温度远大于晶格温度。如果电子的温度足够高并且 Fermi-Dirac 分布的尾部趋向真空,在此情况下将会导致热电子发射<sup>[6~8]</sup>。Gloskovskii 等<sup>[9]</sup>通过实验研究了飞秒激光与银箔、金箔作用时的热电子发射,并运用多光子发射和热电子发射理论解释了实验中的相关现象;Riffe 等<sup>[10]</sup>通过求解 Richardson-Dushman 方程,数值模拟了单脉冲飞秒激光烧蚀金箔过程中的热电子发射;陈安民等<sup>[8]</sup>则采用双温模型与 Richardson-Dushman 方程相结合的方法估算了单脉冲飞秒激光烧蚀铜箔的热电子发射,并对热电子发射对于烧蚀温度场的影响做了分析。

上述研究均以单脉冲飞秒激光烧蚀为对象,而鲜有多脉冲飞秒激光烧蚀金属箔的数值模拟研究。在多脉冲飞秒激光烧蚀金属箔的过程中,随着激光脉冲个数的增加,金属箔表面形貌会出现纳米结构和微米结构<sup>[11,12]</sup>,这种变化会导致金属箔对飞秒激光的反射率、表面吸收率以及表面吸收系数的变化。本文以双温模型和 Richardson-Dushman 方程为基础,对多脉冲飞秒激光烧蚀铜箔过程中的热电子发射进行了数值模拟。在模拟的过程中充分考虑了铜箔表面的反射率、表面吸收率以及表面吸收系数随着脉冲个数的增加而出现变化等因素,并以此为依据部分改写了飞秒激光光源项,从而实现了多脉冲飞秒激光烧蚀铜箔过程中热电子发射的动态数值模拟。

## 2 理论模型

### 2.1 热电子发射的理论模型

由于超短激光脉冲烧蚀物质的机理和长脉冲激光的不同,双温模型将飞秒激光作用下的物质分成了电子和晶格两个系统,分别描述了烧蚀过程中电子和晶格的温度变化。双温模型的方程为<sup>[13,14]</sup>

$$\begin{cases} C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - g(T_e - T_l) + S(x, t) \\ C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = g(T_e - T_l) \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $T_e$ 、 $T_l$  分别为电子和晶格温度,  $C_e$ 、 $C_l$  分别为电子和晶格系统的比热,  $k_e$  为电子的导热率,  $g$  为电子-晶格的能量耦合系数,  $S(x, t)$  为飞秒激光光源项<sup>[15,16]</sup>。当电子温度低于 Fermi 温度时,电子比热可以表达为  $C_e = \gamma T_e$ ,  $\gamma$  是 Sommerfeld 系数并且  $\gamma = \pi^2 n_e k_B / (2T_F)$ , 其中  $n_e$  为电子密度,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T_F$  为 Fermi 温度;电子导热率  $k_e = k_0 B T_e / (A T_e^2 + B T_l)$ , 其中  $k_0$  是在初始温度电子和晶格处于热平衡时的电子导热率,  $A$  和  $B$  为常数<sup>[7,8]</sup>。

飞秒激光与金属相互作用时,通过光子和电子的能量耦合作用使电子在极短的时间内温度迅速上升,从而会产生热电子发射。金属的热电子发射率可以通过 Richardson-Dushman 方程<sup>[9,10]</sup>来表达:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \pi R_1 R_2 C (k_B T_e) \exp \left( - \frac{E_F - u + e\varphi + a_1 e^2 N / R_1}{k_B T_e} \right) \\ N(t) = \frac{k_B T_e}{a_1 e^2 / R_1} \ln \left[ 1 + C t \pi R_2 a_1 e^2 k_B T_e \exp \left( - \frac{E_F - u + e\varphi}{k_B T_e} \right) \right] \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $N$  为离开金属的电子数,  $E_F$  为 Fermi 能,  $u$  为化学势,  $\varphi$  为金属的功函数,  $e$  为电子电荷,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为椭圆形飞秒激光脉冲斑点在半峰全宽处的长轴和短轴,  $a_1$  为常数,  $C = 4\pi m / h^3$ ,  $m$  为电子质量,  $h$  为 Planck 常量<sup>[7,10]</sup>。金属表面的热电子发射将导致金属内部电子密度的变化,从而导致 Sommerfeld 系数发生变化,并最终影响到电子和晶格温度。热电子发生将导致电子的扩散运动,因此通过电子扩散方程来计算电子密度的变化<sup>[7,8]</sup>:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 n_e}{\partial x^2}, \quad (3)$$

式中  $D_e$  为电子扩散系数,可以通过 Einstein 关系方程得到:  $D_e = 3k_e / (\pi^2 n_e k_B)$ 。采用有限差分法对上述方程进行求解,并且(1),(3)式的初值条件和边值条件分别为  $T_e(x, 0) = T_1(x, 0) = 300 \text{ K}$ ,  $T_e(d, t) = T_1(d, t) = 300 \text{ K}$ ;  $n_e(x, 0) = n_{e0}$ ,  $n_e(d, t) = n_{e0}$ 。其中  $d$  为金属箔的厚度,  $n_{e0}$  为初始的电子密度。

## 2.2 激光光源项的改写

在多脉冲飞秒激光烧蚀金属的过程中,金属表面对飞秒激光的反射率、表面吸收率以及表面吸收系数会随着脉冲个数的增加而发生变化。然而目前鲜有研究者在数值模拟多脉冲飞秒激光与物质的作用时考虑这些变化因素。在充分考虑这些变化因素后,飞秒激光光源项可改写为

$$S(x, t) = \frac{4\pi I_0 [1 - R(T_e)] b(T) \beta(T) \exp\left[-xb(T) - 2.77 \left(\frac{t-t_0}{t_p}\right)^2\right]}{t_p}, \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (4)$$

式中  $I_0$  为飞秒激光的平均功率密度,  $R(T_e)$  为金属表面反射率,  $\beta(T)$  为金属表面吸收率,  $b(T)$  为金属表面吸收系数,  $t_p$  为飞秒激光的脉冲宽度,  $t_0$  为飞秒激光峰值功率所对应的时间点。  $\beta(T)$  和  $b(T)$  可表示为<sup>[17,18]</sup>:

$$\beta(T) = \sqrt{\frac{4\pi c \epsilon_0 [1 + \alpha(T - T_0)]}{\lambda_0 \sigma_0}}, \quad (5)$$

$$b(T) = \sqrt{\frac{4\pi \sigma_0}{\lambda_0 c \epsilon_0 [1 + \alpha(T - T_0)]}}, \quad (6)$$

式中  $\alpha$  为金属的电阻温度系数,  $\lambda_0$  为飞秒激光波长,  $\sigma_0$  为金属初始温度时的电导率,  $T$  为金属温度,  $\epsilon_0$  为介电常数,  $c$  为光速。金属表面的反射率  $R(T_e)$  可通过菲涅耳公式得到<sup>[11]</sup>:

$$R(T_e) = \left| \frac{\epsilon(\omega)^{1/2} - 1}{\epsilon(\omega)^{1/2} + 1} \right|^2, \quad (7)$$

式中

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu_{\text{eff}})}. \quad (8)$$

由此可推导出

$$\epsilon(\omega)^2 = \epsilon(\omega)\epsilon(\omega)^* = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{\text{eff}}^2}\right)^2 + \left[\frac{\omega_p^2 \nu_{\text{eff}}}{\omega(\omega^2 + \nu_{\text{eff}}^2)}\right]^2, \quad (9)$$

式中  $\epsilon(\omega)$  为复介电函数,  $\omega$  为飞秒激光频率,  $\nu_{\text{eff}}$  为粒子之间的有效碰撞频率。  $\nu_{\text{eff}} = \nu_{e\text{-ph}} + \nu_{ee}$ ,  $\nu_{e\text{-ph}}$  为电子和光子之间的碰撞频率, 并且  $\nu_{e\text{-ph}} = \alpha_1 I_0 / (h\omega n_e)$ ,  $\alpha_1$  为单脉冲飞秒激光与金属作用时的穿透深度, 其值约为  $2 \text{ nm}$ ;  $\nu_{ee}$  为电子和电子之间的碰撞频率, 并且  $\nu_{ee} = V_F \sigma_{ee} n_e (k_0 T_e / \epsilon_F)^2$ , 其中  $V_F$  为 Fermi 表面的电子速度, 其值约为  $10^8 \text{ m/s}$ ,  $\sigma_{ee}$  为电子与电子相互作用的 Rutherford 截面, 其值约为  $5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ;  $\omega_p$  为等离子体碰撞频率,  $\omega_p = (4\pi n_e e^2 / m)^{1/2}$ ,  $m$  为电子质量<sup>[19]</sup>。通过(5)~(7)式可以得出,在多脉冲飞秒激光与金属箔作用的过程中,充分考虑金属箔对飞秒激光的反射率、表面吸收率以及表面吸收系数的变化,光源项可改写为

$$S(x, t) = \frac{4\pi I_0 [1 - R(T_e)] \exp\left[-2.77 \left(\frac{t-t_0}{t_p}\right)^2\right] \times \exp\left[-\sqrt{\frac{4\pi \sigma_0}{\lambda_0 c \epsilon_0 [1 + \alpha(T - T_0)]}} x\right]}{\lambda_0 t_p}, \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (10)$$

## 3 计算结果与分析

以单晶铜为模拟对象,并假设铜箔的厚度为  $1000 \text{ nm}$ ,铜箔的热物理参数参照表 1<sup>[6~12]</sup>。飞秒激光采用深圳市激光工程重点实验室的掺钛蓝宝石飞秒激光器,其具体参数为:脉宽  $200 \text{ fs}$ ,中心波长  $800 \text{ nm}$ ,单脉冲能量  $2 \text{ mJ}$ ,重复频率  $250 \text{ kHz}$ 。通过隐式格式的有限差分法对方程(1)~(3)进行求解。

图 1 展示了铜箔表面的反射率  $R$ ,表面吸收率  $\beta$  以及表面吸收系数  $b$  随着脉冲个数的变化关系。从图中可以看到,随着脉冲个数的增加,铜箔表面的反射率  $R$  以及表面吸收系数  $b$  逐渐减小,而表面吸收率  $\beta$  逐渐增大。但是由于在激光光源项的表达式可以知道,铜箔表面吸收率  $\beta$  和表面吸收系数  $b$  的乘积相互抵消,故激光光源项仅受到反射率  $R$  以及表面吸收系数  $b$  的影响。因此,随着飞秒激光脉冲个数的增加,铜箔对激光的吸

收逐渐增强。

表 1 材料的热物理参数

Table 1 Thermophysical properties of material

Physical quantity	Unit	Value	Physical quantity	Unit	Value
$g$	$10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	10	$n_{e0}$	$10^{28} \text{ m}^{-3}$	8.47
$k_0$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	401	$R_1$	$\mu\text{m}$	165
$C_1$	$10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	3.5	$R_2$	$\mu\text{m}$	67
$T_F$	$10^4 \text{ K}$	8.12	$a_1$		2
$A$	$10^7 \text{ s}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$	1.28	$\alpha$	$10^{-3} \text{ K}^{-1}$	4.3
$B$	$10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$	1.23	$\sigma_0$	$10^7 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	5.7
$T_0$	$\text{K}$	300	$\varphi$	$\text{eV}$	4.65

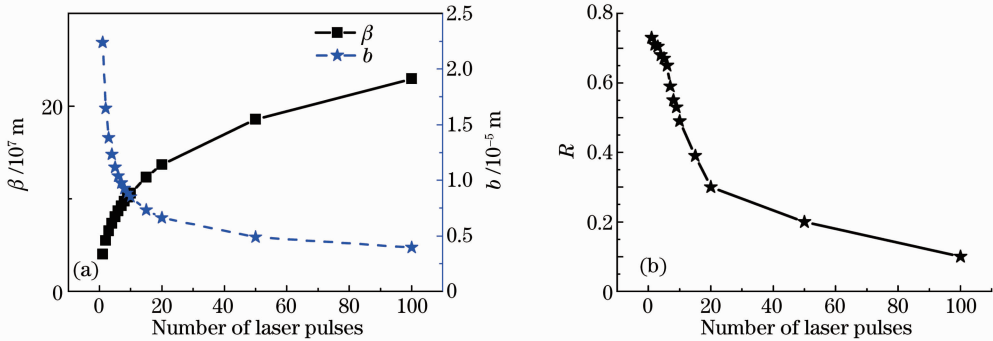


图 1 表层处 (a)  $\beta$ ,  $b$  以及 (b)  $R$  随脉冲个数的变化关系。  $I_0 = 1200 \text{ J/m}^2$

Fig. 1 Dependence of (a)  $\beta$ ,  $b$  and (b)  $R$  of surface on number of laser pulse with  $I_0 = 1200 \text{ J/m}^2$

图 2 展示了在 5 个飞秒激光脉冲作用下,距铜箔表面不同深度处电子发射个数随时间的变化关系。从图中可以清晰地看到铜箔表面的反射率  $R$ , 表面吸收率  $\beta$  以及表面吸收系数  $b$  的变化对铜箔发射电子个数的影响。第一个飞秒激光脉冲作用时,电子发射个数几乎不受  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  影响;随着飞秒激光脉冲个数的增加,铜箔的  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化对铜箔电子发射个数的影响逐渐加剧。对于上述结果分析认为:第一个飞秒激光脉冲和铜箔作用时,铜箔的  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  几乎不受影响,因此在第一个飞秒激光脉冲作用期间,铜箔的电子发射个数受  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  变化的影响最小。随着飞秒激光脉冲个数的增加,受电子和晶格温度以及电子发射的影响,铜箔表面会出现微结构,这种变化导致了飞秒激光对铜箔的  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的影响逐渐加剧(如图 1 所示),因此  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化对铜箔电子发射个数的影响会随着激光脉冲个数的增加而逐渐加剧。

以 5 个飞秒激光脉冲与铜箔作用为例,在考虑  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化时,铜箔表层的最大发射电子数为  $1.12 \times 10^{28}$ ,而不考虑  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化时,铜箔表层的最大发射电子数仅为  $1.01 \times 10^{28}$ 。因此,在多脉冲飞秒激光与铜箔作用时,参数  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化对电子发射造成的影响成为不可忽视的因素。

图 3 展示了在 5 个飞秒激光脉冲与铜箔作用时,最大发射电子数随着距铜箔表面深度的变化。从图中可以看出随着深度的增加,  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化对电子发射的影响逐渐减弱。对于上述结果分析认为:随着距铜箔表面深度的增加,飞秒激光脉冲对铜箔的影响逐渐减弱。飞秒激光对铜箔表面的  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的影响最大,因此铜箔的表面以及靠近铜箔表面的区域  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化对电子发射的影响最大;而在远离铜箔表面的区域飞秒激光对于  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的影响较小,因此在该区域其对电子发射的影响较小。

图 4 展示了在不同个数的飞秒激光脉冲作用下,铜箔表面的反射率  $R$ , 表面吸收率  $\beta$  以及表面吸收系数

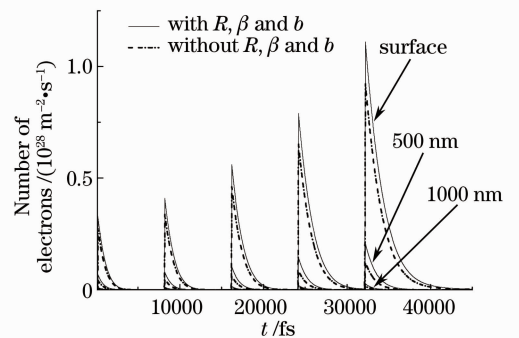


图 2 距表面不同深度处电子发射个数随时间的变化关系

Fig. 2 Change of number of emission electrons with different depths

$b$  的变化对于铜箔表层电子温度的影响。从图 4 可以清晰地看到随着飞秒激光脉冲个数的增加,  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化对于铜箔表层电子温度的影响逐渐加大。对于上述模拟结果分析认为: 随着脉冲个数的增加, 通过飞秒激光光子、铜箔电子以及晶格之间的相互作用逐渐对铜箔产生烧蚀, 从而使铜箔的  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  产生变化。因此铜箔表面对于飞秒激光的有效吸收会随着激光脉冲个数的增加而增加, 并且该变化会导致铜箔具有更高的电子温度、晶格温度以及电子发射数, 从而造成  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  变化加剧, 并最终造成了随着脉冲个数的增加, 在  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  变化的影响下, 铜箔表层电子具有更高的温度。这就证明了在多脉冲飞秒激光烧蚀金属的数值模拟中, 参数  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化对电子温度所造成的影响是不可忽视的因素。

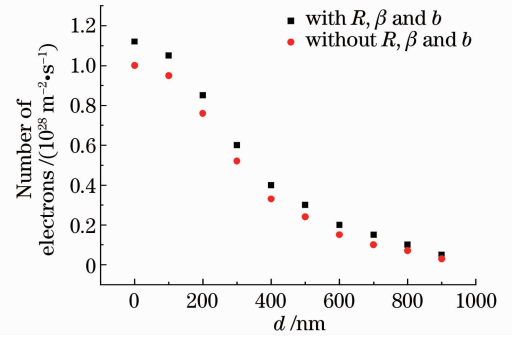


图 3 距表面不同深度处最大发射电子数  
Fig. 3 Maximum number of electron versus depth

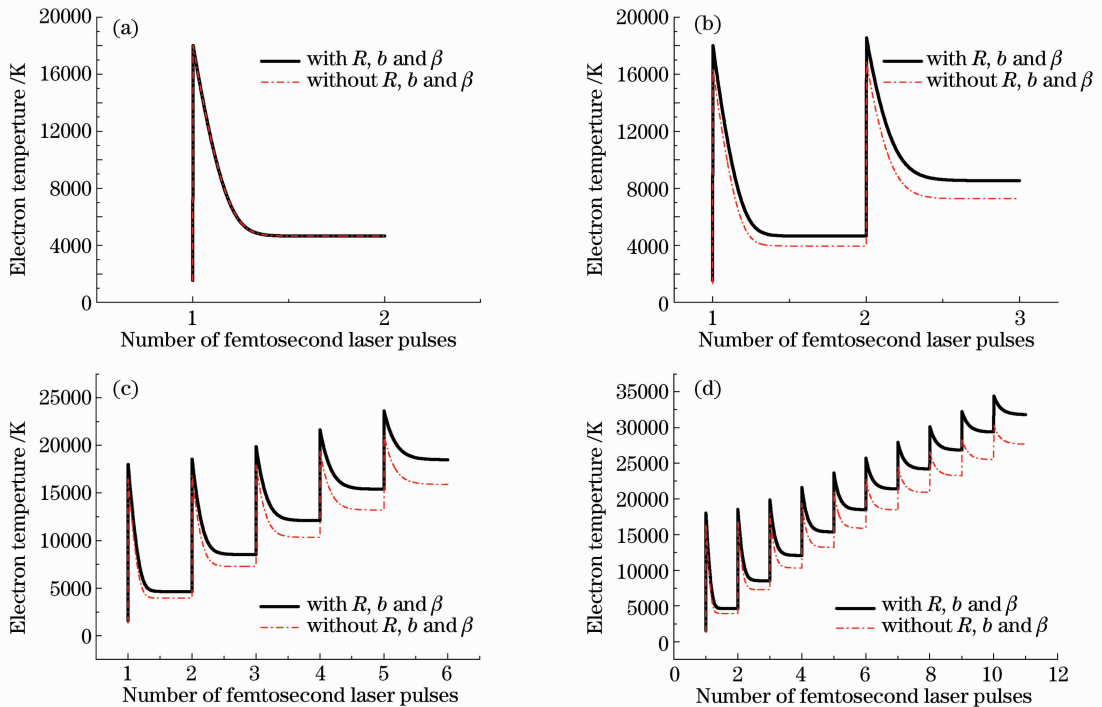


图 4 不同飞秒脉冲个数时铜箔表面电子温度的变化。(a) 1 个脉冲; (b) 2 个脉冲; (c) 5 个脉冲;  
(d) 10 个脉冲。  $I_0 = 1200 \text{ J/m}^2$

Fig. 4 Electron temperature with different numbers of pulses. (a) 1 pulse; (b) 2 pulses; (c) 5 pulses;  
(d) 10 pulses. Laser power  $I_0 = 1200 \text{ J/m}^2$

在多脉冲飞秒激光与铜箔的作用过程中, 激光脉冲的间隔时间也会对铜箔的电子发射以及温度场产生影响。图 5 展示了激光脉冲间隔对于电子发射以及电子温度的影响。以双脉冲飞秒激光与铜箔作用为例, 通过对脉冲间隔大于电子与晶格的耦合时间  $t$  以及小于  $t$  的数值模拟对比发现: 对于电子发射, 脉冲间隔小于  $t$  时铜箔的最大发射电子数较大; 对于电子温度, 脉冲间隔小于  $t$  时具有较大的最大电子温度。对于上述数值模拟结果, 分析认为: 和飞秒激光脉冲间隔时间大于  $t$  时相比, 当飞秒激光脉冲间隔小于  $t$  时, 连续的飞秒激光脉冲对于铜箔的累积烧蚀严重, 从而使铜箔的反射率  $R$ 、表面吸收率  $\beta$  以及表面吸收系数  $b$  产生更大的变化, 因此在此情况下, 铜箔具有更大的发射电子数和电子温度。

## 4 结 论

通过双温模型结合 Richardson-Dushman 方程对多脉冲飞秒激光烧蚀铜箔的过程中热电子发射进行了

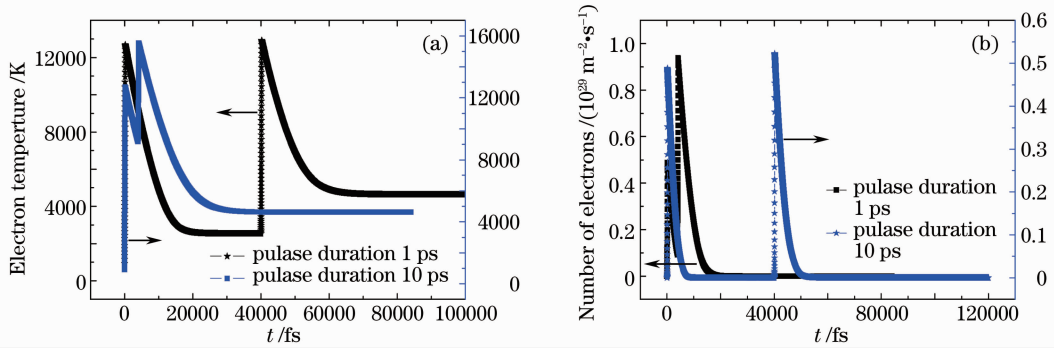


图5 飞秒激光脉冲间隔时间对铜箔(a)表面电子温度以及(b)电子发射的影响。双脉冲  $I_0 = 600 \text{ J/m}^2$

Fig. 5 Influence of pulse spacing to (a) electron temperature and (b) number of emission electrons.

Two pulses with  $I_0 = 600 \text{ J/m}^2$

数值模拟。在模拟的过程中充分考虑了随着飞秒激光脉冲个数的增加,金属箔对飞秒激光的反射率  $R$ 、表面吸收率  $\beta$  以及表面吸收系数  $b$  的变化等因素,部分改写了飞秒激光光源项,从而实现了多脉冲飞秒激光烧蚀铜箔的热电子发射和温度场的动态数值模拟。数值模拟发现:

1) 在多脉冲飞秒激光与铜箔的作用过程中,随着脉冲个数的增加,铜箔表面的反射率  $R$  和表面吸收系数  $b$  逐渐减小,表面吸收率  $\beta$  逐渐升高,这些变化使多脉冲飞秒激光照射下的铜箔具有更高的发射电子数和电子温度。

2) 随着铜箔厚度的增加,多脉冲飞秒激光对铜箔烧蚀逐渐减弱,因此铜箔的表面以及靠近铜箔表面的区域内  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的变化较大,故该区域的电子发射和温度场受  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的影响较大,而远离铜箔表面区域的电子发射和温度场受  $R$ 、 $\beta$  以及  $b$  的影响较小,甚至不受影响。

3) 由于多脉冲飞秒激光累积烧蚀作用对于铜箔表面的反射率  $R$ 、表面吸收率  $\beta$  以及表面吸收系数  $b$  的影响,飞秒激光的脉冲间隔越小,铜箔具有越高的电子发射个数和温度场。

### 参 考 文 献

- 1 S. I. Anisimov, B. L. Kapeliovich, T. L. Perelman *et al.*. Electron emission from metal surfaces exposed to ultra short laser pulses[J]. *Sov. Phys. JETP*, 1974, **39**: 375~378
- 2 T. Q. Qiu, C. L. Tien. Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals[J]. *J. Heat Transfer*, 1993, **115**(4): 835~841
- 3 Ni Xiaochang, Wang Qingyue. Finite difference method for thermal analysis of femtosecond-picosecond pulse laser ablation on metal surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 277~280  
倪晓昌,王清月. 飞秒、皮秒激光烧蚀金属表面的有限差分热分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 277~280
- 4 Wang Defei, Yu Jiping, Guo Chunfeng *et al.*. Thermal effect analysis of metal film ablation by ultra-short laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1579~1584  
王德飞,于继平,郭春风等. 超短脉冲激光烧蚀金属薄膜材料的热效应分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(10): 1579~1584
- 5 Ren Naifei, Xu Meiling, Gu Jiafang *et al.*. Analysis of thermalization dynamics on ferromagnetic thin film excited by femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2057~2062  
任乃飞,许美玲,顾佳方等. 飞秒激光作用下铁磁薄膜的热化动力学分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2057~2062
- 6 X. Y. Wang, D. M. Riffe, Y. S. Lee *et al.*. Time-resolved electron-temperature measurement in a highly excited gold target using femtosecond thermionic emission[J]. *Phys. Rev. B*, 1994, **50**(11): 8016~8019
- 7 T. Balasubramani, S. H. Jeong. Simulation of the thermionic emission during ultrashort pulse laser ablation of metals[J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2007, **59**(1): 595~599
- 8 Chen Anmin, Gao Xun, Jiang Yuanfei *et al.*. Numerical simulation of femtosecond laser heating of metal films using electron thermal emission[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(10): 7198~7201  
陈安民,高 勋,姜远飞等. 数值模拟飞秒激光加热金属的热电子发射[J]. 物理学报, 2010, **59**(10): 7198~7201
- 9 A. Gloskovskii, D. A. Valdaitsev, M. Cinchetti *et al.*. Electron emission from films of Ag and Au nanoparticles excited by a femtosecond pump-probe laser[J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **77**(19): 195427

- 10 D. M. Riffe, X. Y. Wan, M. C. Downer *et al.*. Femtosecond thermionic emission from metals in the space-charge-limited regime[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(8): 1424~1435
- 11 A. Y. Vorobyev, Chunlei Guo. Reflection of femtosecond laser light in multipulse ablation of metals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110**(4): 043102
- 12 A. Y. Vorobyev, Chunlei Guo. Enhanced absorptance of gold following multipulse femtosecond laser ablation[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**(19): 195422
- 13 Yuichiro Yamashita, Takehiko Yokomine, Shinji Ebara *et al.*. Heat transport analysis for femtosecond laser ablation with molecular dynamics: two temperature model method[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, **81**(8-14): 1695~1700
- 14 Lan Jiang, Hai-Lung Tsai. Improved two-temperature model and its application in ultrashort laser heating of metal films [J]. *J. Heat Transfer*, 2005, **127**(10): 1167~1173
- 15 N. N. Nedialkov, P. A. Atanasov, S. Amoruso *et al.*. Laser ablation of metals by femtosecond pulses: theoretical and experimental study[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 7761~7766
- 16 J. K. Chen, J. E. Beraun. Modelling of ultrashort laser ablation of gold films in vacuum[J]. *J. Opt. A*, 2003, **5**(3): 168~173
- 17 Li Li, Duanming Zhang, Zhihua Li *et al.*. The investigation of optical characteristics of metal target in high power laser ablation[J]. *Physica B*, 2006, **383**(2): 194~201
- 18 Li Li, Zhang Duanming, Fang Ranran *et al.*. Residual energy in femtosecond multipulse laser ablation of metal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1671~1676  
李莉, 张端明, 房然然等. 飞秒多脉冲激光烧蚀金属过程中的能量剩余现象[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(11): 1671~1676
- 19 Zheng Qiguang, Gu Jianhui. Interaction between Laser and Materials[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. 22~24  
郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996. 22~24