

# Research on Thermo Effects of Cu Modified by Intense Pulsed Ion Beam<sup>\*</sup>

Di Wu

College of Physical Science and Technology, Dalian University, Dalian  
Email: wudi@dlu.edu.cn

Received: Dec. 28<sup>th</sup>, 2012; revised: Jan. 20<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jan. 27<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** A modification method for Copper target by intense pulsed ion beam (IPIB) irradiation has been reported. Based on the temporal and spatial distribution models of the ion beam density detected by Faraday cup in the chamber and the ions accelerating voltage, the energy deposition of the beam ions in Cu is calculated by Monte Carlo method. Taking this time-dependent nonlinear deposited energy as the source term of two-dimensional thermal conduction equation, the temporal and spatial ablation process of metal Cu during a pulse time was obtained. Only a little area of material is ablated off due to the vaporization compared with the melting ablation area on the surface after a shot. The most deep melting depth is in the irradiation centre. The melting and vaporizing thicknesses decrease with the increasing distance from the irradiation centre. The top-layer Copper material in thickness of about 0.2  $\mu\text{m}$  is ablated by vaporization and the layer in thickness of 1.3  $\mu\text{m}$  is melted after one shot under the ion beam density of 300  $\text{A}/\text{cm}^2$ . The thermal transportation along the longitudinal direction in the specimens is less than 2.0  $\mu\text{m}$  during a pulse.

**Keywords:** Intense Pulsed Ion Beam; Two-Dimensional Numerical Model; Ablation Process; Copper

## 强流脉冲离子束辐照铜靶热效应数值研究<sup>\*</sup>

吴迪

大连大学, 物理科学与技术学院, 大连  
Email: wudi@dlu.edu.cn

收稿日期: 2012年12月28日; 修回日期: 2013年1月20日; 录用日期: 2013年1月27日

**摘要:** 为了研究强脉冲离子束辐照改性铜靶的行为, 建立了基于靶室中法拉第杯检测的离子束流密度和离子加速电压时空分布模型; 采用蒙特卡罗方法计算了束流在铜靶中的能量沉积, 并将这随时间变化的非线性沉积能量作为热传导方程的热源项, 计算得到了脉冲期间靶材内部温度场的演化规律。一次脉冲后与液化烧蚀相比, 靶材表面较小区域的物质气化烧蚀掉, 辐照中心处熔化的厚度最大; 气、液化烧蚀厚度随偏离中心位置而减小。当束流密度为 300  $\text{A}/\text{cm}^2$  时, 中心区域气化烧蚀和液化烧蚀的厚度分别达到 0.2 微米和 1.3 微米; 脉冲期间热量延纵深方向的传播距离小于 2 微米。

**关键词:** 强脉冲离子束; 二维数值模型; 烧蚀过程; 铜靶

### 1. 引言

近几十年来强流脉冲离子束(IPIB)在物理学、材料科学领域里进行了广泛的研究<sup>[1-4]</sup>。IPIB 由磁绝缘

二极管(MID)产生, 离子的能量由加载在二极管上的电压决定<sup>[5]</sup>。IPIB 中的离子能量可以达到几十 keV 到几个 MeV, 在小于脉冲时间 1 微秒内束流的高能量有效地沉积在离子射程 0.1~10  $\mu\text{m}$  之内, IPIB 与铜相互作用导致其表层快速熔化甚至气化。熔化的

<sup>\*</sup>基金项目: 本项目由国家自然科学基金资助(资助号: 11175031)。

表面物质因热传导而固化，材料表面物理和化学性质因此被改变<sup>[6,7]</sup>。许多科研人员在理论和实践上对这些现象进行了研究<sup>[8-11]</sup>。

我们基于从俄罗斯引进的强脉冲离子束产生装置 TEMP-6 型设备参数对 IPIB 与金属铜相互作用的热效应进行了数值研究。

## 2. 物理模型

TEMP 系列离子源中，当 MID 阳极使用聚乙烯涂层时所产生的束流中主要成份约有 70%  $H^+$  和 30%  $C^+$ 。实验中 MID 平均加速电压为 300 kV，脉冲宽度 120 ns，离子束流密度存在空间分布。

根据 IPIB 辐照实验，MID 电压可以表示为<sup>[12]</sup>：

$$U(t) = A \exp\left[-\frac{(t-t_{0U})^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (1)$$

由法拉第杯检测的离子束流密度为：

$$J(y,t) = B \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right] \exp\left[-\frac{(t-t_{0J})^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (2)$$

其中  $y_0$  表示束流入射中心点的坐标，其方向因对称性选为沿铜靶材表面任意方向， $x$  轴正向指向靶材内部； $A$  和  $B$  分别表示 MID 电压和离子束流密度的峰值； $t_{0U}$  和  $t_{0J}$  对应电压和离子束流密度达到峰值时的时间； $\sigma_1$ 、 $\sigma$  和  $\sigma_2$  分别表示电压和离子束流密度的标准偏差。在  $(x, y)$  处随时间变化的总沉积能量为：

$$E_s(x, y, t) = \int_0^t \frac{dE(x)}{dx} \frac{J(y, t) \cos \theta}{q} dt \quad (3)$$

能量沉积项  $dE(x)/dx$  由通用的离子与靶材相互作用的计算程序 TRIM 完成， $\theta$  是离子束入射角度，计算时我们取  $\theta = 45^\circ$ ， $q$  代表单一离子的电荷量。

$E_s(x, y, t)$  是 IPIB 辐照样本时二维瞬态热传导方程中的热源项，控制方程为：

$$\begin{aligned} \rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + E_s(x, y, t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\rho$ 、 $C(T)$  和  $\kappa(T)$  分别表示质量密度、比热容和热传导系数。初始条件取为室温  $T(x, y, 0) = T_0$ ，外表面取为绝热边界条件。计算中取铜样本尺寸  $50 \times 50$

mm<sup>2</sup>，厚度为 50  $\mu\text{m}$ ，初始温度  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 。采用有限差分法解(1)~(4)的非线性热传导方程组。

## 3. 数值结果与讨论

模拟计算了脉冲期间内 IPIB 与铜靶之间的相互作用过程，金属铜的热物性参数取自文献[13]。根据 MID 电压模型、离子束流密度模型以及非线性瞬态热传导方程计算得到了 IPIB 辐照中心靶材内部不同深度处的温度场时空演化图谱，结果如图 1 所示，分别给出了脉冲开始 20、40、60、80、100 和 120 ns 时的温度分布曲线。从图中可以看出脉冲开始 40 ns 后辐照中心约有 0.33  $\mu\text{m}$  厚的材料熔化，80 ns 时约有 0.18  $\mu\text{m}$  厚的材料气化，100 ns 时这一深度没有增加。图 2 给出了束流密度为 300 A/cm<sup>2</sup> 时靶材内部不同深度烧蚀状况时间演化图谱，样本表面辐照中心处在脉冲开始大约 20 ns 后达到熔点，30 ns 后中心处约 0.15  $\mu\text{m}$  厚的顶层材料熔化；脉冲结束后，约 0.18  $\mu\text{m}$  厚的顶层物质因气化烧蚀掉，约 1.52  $\mu\text{m}$  厚的铜材料熔化。除去气化烧蚀层，厚约 1.34  $\mu\text{m}$  的熔化物质因热传导而重新固化。

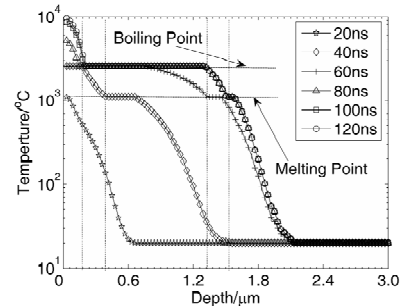


Figure 1. Temporal-spatial evolution of temperature of Cu target centre irradiated by IPIB under the ion beam density of 300 A/cm<sup>2</sup>  
图 1. 束流密度为 300 A/cm<sup>2</sup> 时，IPIB 辐照铜靶材中心处的温度场时空演化图谱

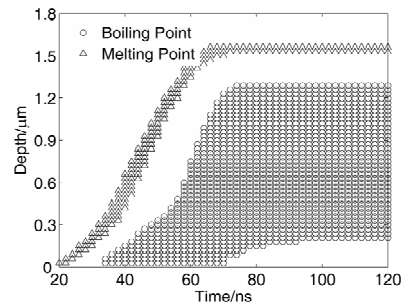


Figure 2. The time evolution profile of the target material ablative process at beam incident center  
图 2. 束流入射中心靶材烧蚀过程时间演化图

图3给出脉冲结束后铜靶材内部的熔融和气化烧蚀状况图谱。一次脉冲后表面液化烧蚀区域比气化烧蚀区域大很多；在靶材内部，很大区域内的靶材物质达到气化温度，但最终没能吸收足够的气化潜热而喷发，只有0.18 μm后的物质气化烧蚀喷发；从图中还可以看出不论气化烧蚀还是液化烧蚀最大烧蚀处都在辐照中心区域。图4给出了靶材内部脉冲期间不同时刻的熔融烧蚀等势曲线，靶材表面及内部熔融烧蚀区域均随时间的增加而增加，脉冲结束后表面液化烧蚀宽度达到30 mm，纵向深度达到1.5 μm，与图3的结果是一致的。图5给出脉冲辐照期间样本中心及4.0 mm和5.0 mm 偏离处的气化烧蚀时间演化图谱，脉冲结束后中心处的最大气化烧蚀深度为0.18 μm，偏离中心4 mm 处物质脉冲结束后的最大烧蚀深度为0.09 μm，而5 mm 处这一深度只有0.06 μm；从图中还可以看出靶材内部与中心偏离的某些区域永远不会被气化烧蚀。

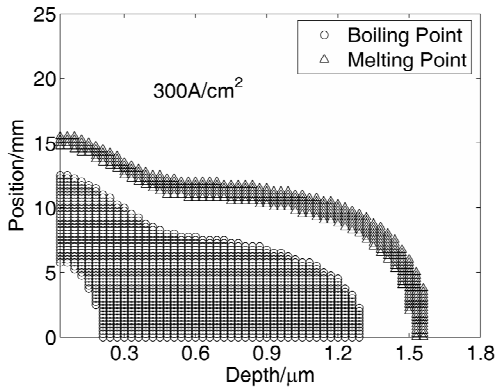


Figure 3. Sample material ablation distribution profile in Cu at the end of a pulse

图3. 脉冲结束后铜靶表面及内部烧蚀图

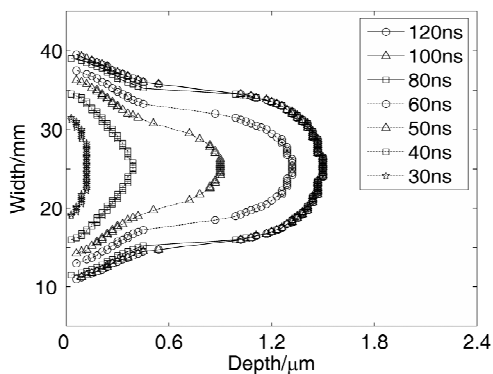


Figure 4. Sample material melting ablation curve in the Cu as a function of time during a pulse

图4. 脉冲期间靶材内部不同时间的熔融烧蚀曲线

图6给出脉冲辐照期间样本中心及10.0 mm 和15.0 mm 偏离处的液化烧蚀时间演化图谱，辐照中心在脉冲开始20 ns 后开始熔化，偏离中心10 mm 处则在40 ns 后开始熔化，15 mm 处则在120 ns 时才开始熔化；脉冲结束后中心约1.5 μm 深物质熔化，这与前面得到的结果是一致的；偏离中心10 mm 处对应深度约0.9 μm 的靶材物质熔化，而偏离中心15 mm 处则只有表层物质脉冲结束后才熔化；从图中还可以看出靶材内部与中心偏离的某些区域永远不会被熔融烧蚀。图7给出了铜材内部辐照中心处及5.0 mm 和10.0 mm 偏离处的温度场演化图谱。脉冲结束后辐照中心表面处的温度最高，深度越深温度越低；偏离中心越远表面温度也越低；同一纵向深度处偏离中心越远温度越低。一次脉冲后靶材温度场的等势图如图8所示，温度分布清晰可见，束流入射表面中心处温度最高，一次脉冲期间沿靶材纵向深度热传导距离小于2.0 μm。

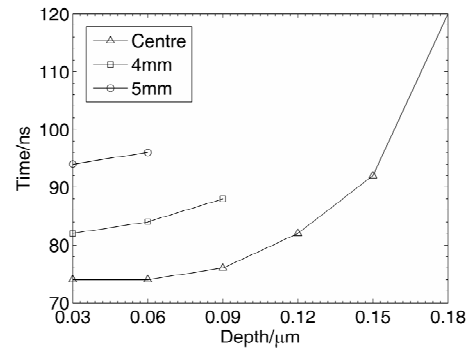


Figure 5. The evaporating ablation evolution profile of shooting centre and at 4.0 mm and 5.0 mm distances away

图5. 脉冲期间样本中心及4.0 mm 和5.0 mm 偏离处的气化烧蚀时间演化图谱

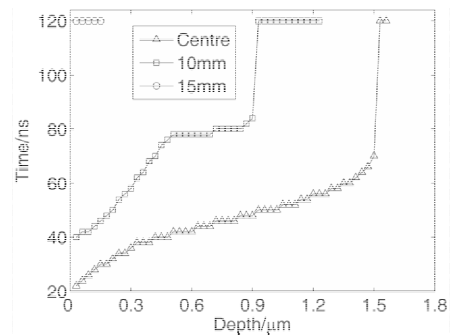


Figure 6. The melting ablation evolution profile of irradiation centre and at 10.0 mm and 15.0 mm distances away

图6. 脉冲期间样本中心及10.0 mm 和15.0 mm 偏离处的熔融烧蚀时间演化图谱

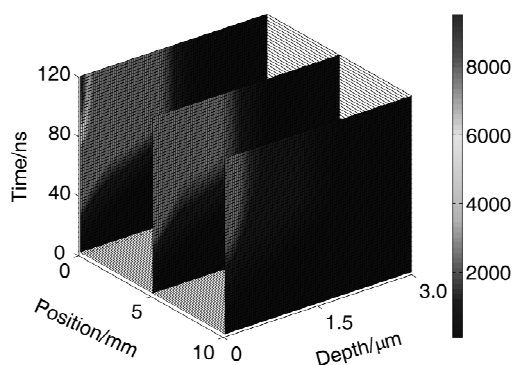


Figure 7. Evolution profile of sample material temperature in the shooting centre and with 5.0 mm and 10.0 mm deviations  
图 7. 脉冲期间样本中心及 5.0 mm 和 10.0 mm 偏离处的温度场时间演化图谱

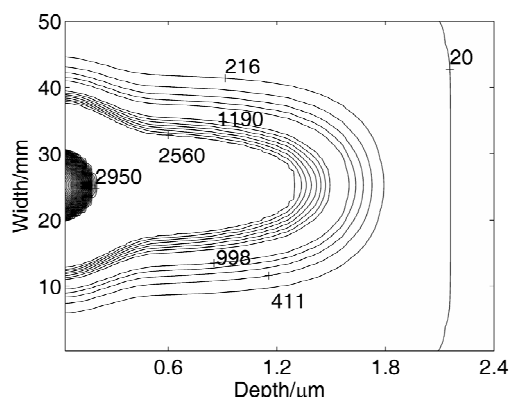


Figure 8. Temperature contour of Cu after the irradiation of IPIB under the ion beam current density of 300 A/cm<sup>2</sup>  
图 8. IPIB 束流密度为 300 A/cm<sup>2</sup> 时一次脉冲辐照后铜靶材温度场分布等势图

#### 4. 结论

根据离子束流密度及 MID 电压时空分布建立了 IPIB 辐照铜靶的二维瞬态热传导模型。根据模型研究了脉冲 120 ns 期间束流辐照改性铜靶的行为。得到了烧蚀过程中铜靶的温度场演化图谱。束流密度为 300 A/cm<sup>2</sup> 时，一次脉冲后表面液化烧蚀区域比气化烧蚀区域大很多，最深熔融烧蚀处在辐照中心；靶材熔化、

气化厚度均随偏离中心位置增加而减小；脉冲结束后约 0.2 μm 厚的顶层材料因气化烧蚀掉，辐照产生的纵向熔融烧蚀厚度达到约 1.3 μm；一次脉冲期间沿靶材纵向深度的热传导距离小于 2.0 μm。

#### 参考文献 (References)

- [1] K. Yatsui, X. D. Kang and T. Sonegawa. Applications of intense pulsed ion beam to materials science. *Physics of Plasmas*, 1994, 1(5): 1730-1737.
- [2] J. Piekoszewski, Z. Werner and W. Szymczyk. Application of high intensity pulsed ion and plasma beams in modification of materials. *Vacuum*, 2001, 63(4): 475-481.
- [3] D. J. Rej, H. A. Davis, J. C. Olson, G. E. Remnev, A. N. Zakoutaev, V. A. Ryzhkov, V. K. Struts, I. F. Isakov, V. A. Shulov, N. A. Nochevnaya, R. W. Stinnett, E. L. Neau, K. Yatsui and W. Jiang. Materials processing with intense pulsed ion beams. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1997, 15(3): 1089-1097.
- [4] W. H. Jiang, K. Ide, S. Kitayama, et al. Pulsed ion-beam evaporation for thin-film deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(2): 1026-1029.
- [5] Z. Werner, J. Piekoszewski and W. Szymczyk. Generation of high-intensity pulsed ion and plasma beams for material processing. *Vacuum*, 2001, 63(4): 701-708.
- [6] G. E. Remnev, I. F. Isakov, M. S. Opekounov, et al. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 114(2-3): 206-212.
- [7] A. D. Korotaev, S. V. Ovchinnikov, Y. I. Pochivalov, et al. Structure-phase states of the metal surface and undersurface layers after the treatment by powerful ion beams. *Surface and Coatings Technology*, 1998, 105(1-2): 84-90.
- [8] X. Y. Le, W. J. Zhao, S. Yan, et al. The thermodynamical process in metal surface due to the irradiation of intense pulsed ion beam. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 158-159: 14-20.
- [9] X. D. Kang, K. Masugata and K. Yatsui. Characteristics of ablation plasma produced by intense, pulsed, ion beam. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1994, 33(2): 1155-1160.
- [10] 杨海亮, 邱爱慈, 张嘉生等. “闪光二号”加速器 HPIB 的产生及应用初步结果[J]. *物理学报*, 2004, 53(2): 406-412.
- [11] J. L. Zhang, C. Tan, W. C. Wang and Y. N. Wang. A spectroscopic scheme to measure the expansion velocity of ablation plasmas formed by high intensive pulsed ion beam. *Vacuum*, 2004, 73(3-4): 673-679.
- [12] D. Wu, Y. Gong, J. Y. Liu, et al. Two-dimensional numerical research on effects of titanium target bombarded by TEMP II accelerator. *Chinese Physics*, 2006, 15(11): 2682-2687.
- [13] B. Kenneth. Periodic table of elements—Copper—Cu, 2012. <http://EnvironmentalChemistry.com/yogi/periodic/Cu.html>