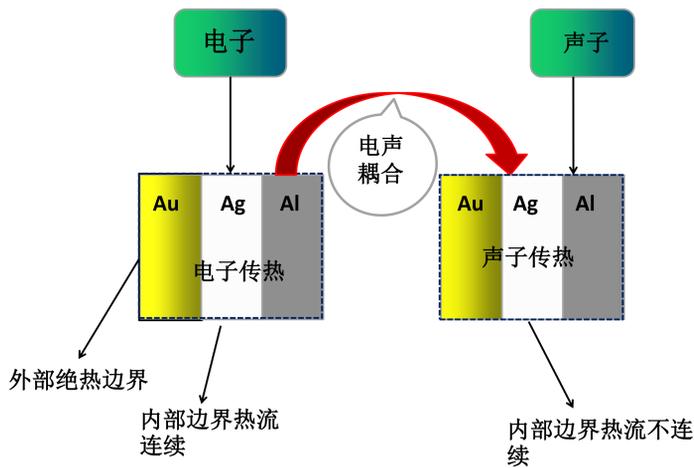


飞秒激光加热多层金属膜的超快加热过程仿真

杜广庆, 陈烽, 杨青, 李会景
西安交通大学电子科学与工程学院电子科学与技术系

简介: 在现代的光电子器件和激光系统中, 多层金属膜具有重要的地位, 例如激光谐振腔中引入多层金属膜可以大大提高激光器谐振腔的损伤阈值, 开发高损伤阈值膜系对于发展高功率激光器具有重要的工程价值。本仿真主要研究飞秒激光激发多层金属膜的超快热弛豫过程, 研究超快温度热场分布的内在物理机制, 并探讨提高多层金属膜系激光损伤阈值的途径。



结果:

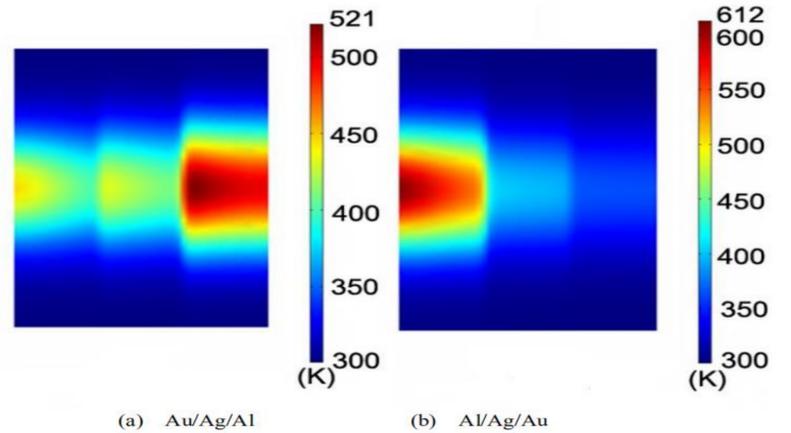


图 1. 三层金属膜中声子温度场分布。图中的色彩代表温度 (红色: 高温, 蓝色: 低温)

项目	Au	Ag	Cu	Al
$G_p/10^{16} \text{ J m}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$	2.1	3.1	10	24.5
$C_p/\text{J m}^{-3} \text{ K}^{-2}$	68	63	97	135
$k_{ep}/\text{J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$	318	428	401	235
$C_p/10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$	2.5	2.5	3.5	0.244
$A/10^7 \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-2}$	1.18	0.932	1.28	0.375
$B/10^{11} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$	1.25	1.02	1.23	3.9

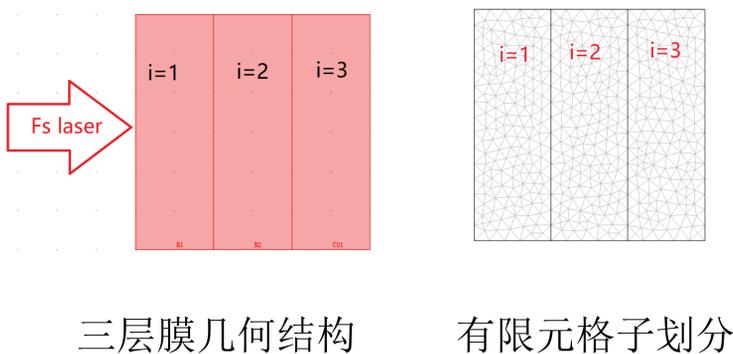
表 1. 非平衡条件下 Au, Ag, Cu 和 Al 的热学性质

计算方法:

(一) COMSOL Multiphysics 瞬态传热模块:

1. 电子系统传热:
$$C_e^{(i)} \frac{\partial T_e^{(i)}}{\partial t} = -\nabla q_e^{(i)} - G(T_e^{(i)} - T_p^{(i)}) + Q^{(1)}$$

2. 声子系统传热:
$$C_p^{(i)} \frac{\partial T_p^{(i)}}{\partial t} = G^{(i)} (T_e^{(i)} - T_p^{(i)})$$



(二) 初始和边界条件

1. 初始条件: $T_e(x, y, \mathbf{0}) = T_p(x, y, \mathbf{0}) = 300\text{K}$

2. 外部边界条件: 热绝缘

$$\left. \frac{\partial T_e}{\partial n} \right|_{\Omega} = \left. \frac{\partial T_p}{\partial n} \right|_{\Omega} = 0$$

内部边界条件: 1. 电子系统: 热流连续

$$\left. \frac{\partial T_e}{\partial n} \right|_{\Omega} - \left. \frac{\partial T_p}{\partial n} \right|_{\Omega} = 0$$

2. 声子系统: 热流不连续

$$\left. \frac{\partial T_e}{\partial n} \right|_{\Omega} - \left. \frac{\partial T_p}{\partial n} \right|_{\Omega} = q_0$$

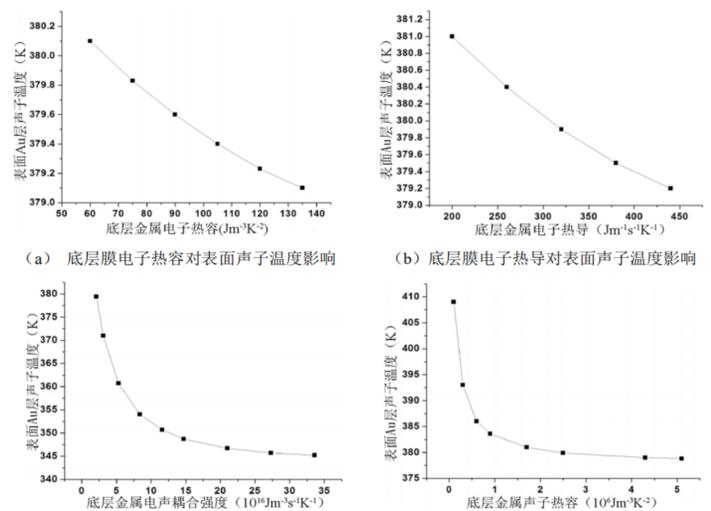


图 2. 底层薄膜热学参数对膜系表面声子温度的影响

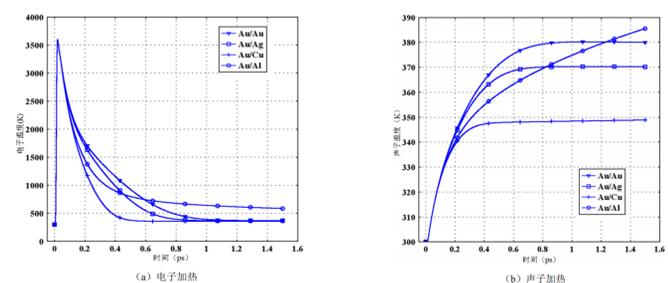


图 3. 不同底层配置对 Au 表面膜系电子、声子加热的影响

结论: 本仿真分析了飞秒激光激发多层金属膜中的超快热弛豫规律, 并对其温度场分布特性进行了详细研究, 发现电声耦合强度和声子热容是影响温度场分配的主要因素。该研究对于澄清飞秒激光与金属作用的超快热弛豫机制, 优化飞秒激光微纳加工中的超快加热过程具有重要意义。

参考文献:

- Sugioka K, Iida M, Takai H, et al. Opt. Lett., 2011, 36(14):2734-2736.
- Deng YP, Xie XH, Xiong H, et al. Opt. Express, 2005, 13(8):3096-3103.