

激光诱导表面周期性结构对铜薄膜红外发射特性的改变

王田宇^{1,2}, 卞进田^{1,2*}, 李欣^{1,2**}, 孔辉^{1,2}, 孙晓泉^{1,2***}

¹国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

²国防科技大学先进激光技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 金属铜在中红外波段的发射率极低, 所以铜薄膜是一种性能优异且对抗被动式中红外热探测器隐身的材料, 而在铜薄膜表面使用激光诱导表面周期性结构(LIPSS)可以显著提高其在中红外波段的发射率。首先使用双温方程模型模拟 LIPSS 形成过程中材料软化的过程, 然后使用波长为 1064 nm 的偏振脉冲激光在融石英基底上的铜薄膜表面诱导产生周期为波长量级的 LIPSS, 最后基于实验产生的铜薄膜 LIPSS 搭建仿真模型并对其在近红外和中红外波段的发射率进行分析。模拟结果表明, 铜薄膜 LIPSS 的产生可以显著提高其在中红外波段的发射率, 该方法可以实现铜薄膜对被动式中红外热探测器的隐身。

关键词 激光光学; 激光损伤; 激光诱导表面周期性结构; 中红外激光; 发射率; 反隐身

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401017

1 引言

激光诱导表面周期性结构(LIPSS)是一种特殊的表面光栅结构。当使用接近材料损伤阈值^[1]的偏振脉冲辐照金属^[2]、半导体^[3]和透明介质^[4]等固体材料时, 在材料表面会形成一系列的周期性条纹结构, 即周期约等于激光波长的低频率周期性结构(LSFL)和周期小于半个激光波长的高频率周期性结构(HSFL)^[5]。微光栅结构的产生改变了材料表面的性质, 改变后的结构具有超亲/疏水性^[6-8]、高吸收率^[9]和抑制杂菌生长^[10]等特性, 为此广泛应用于防水材料制备^[11]、表面微加工^[12-14]、信息编码^[15]以及生物医学^[16]等领域。

金属薄膜是一种新型的薄膜材料, 与传统的透明绝缘介质和聚合物薄膜相比, 其具有机械强度更高、韧性更好和导热性能更优异^[16-19]的优点, 而且激光损伤阈值较大, 可以广泛应用于光学工程领域, 其中铜薄膜在中红外波段的发射率极低。在相同温度

的条件下, 镀铜薄膜后的黑体腔在中红外波段的热辐射能量会大幅度下降, 这会降低被动式中红外探测器的探测效率^[20]。因此, 在热源目标表面镀铜薄膜成为了军事及民用领域对被动式中红外波段探测器隐身的一种新手段, 为此被国内外众多研究团队所重视。2010年, 吴春等^[20]采用了电化学的方法在平板玻璃的表面上制备铜金属膜, 并测定了铜薄膜在 5~24 μm 的波长范围内的发射率, 实验结果表明铜薄膜在这一波段的发射率极低, 证实镀铜薄膜的方法可以降低热源目标的发射率。2018年, Meng等^[21]首先采用了纳米铜颗粒表面溅射的方法在涤纶布的基底上制备铜金属膜, 然后分析了其物理化学性质并测定了其电导率, 最后采用了光谱分析的方法测定铜薄膜的发射率, 发现铜薄膜在中红外波段的发射率小于 0.1。

本文在铜薄膜的表面诱导产生 LIPSS, 并分析铜薄膜在红外波段的发射率变化情况, 该思路为在中红外波段实现隐身奠定基础。

收稿日期: 2020-07-14; 修回日期: 2020-08-31; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 安徽省自然科学基金青年基金(2008085QF314)、先进激光技术安徽省实验室青年基金(ky19c604)、国防科技大学自主科研项目(zk19-15)

*E-mail: bianjintian17@nudt.edu.cn; **E-mail: lixinkiller@nudt.edu.cn; ***E-mail: sun_xq@nudt.edu.cn

2 基本原理

2.1 铜薄膜在中红外波段的发射率

根据基尔霍夫定律可知,热平衡条件下物体的发射率等于吸收率^[22]。空气环境中,金属材料对垂直入射激光的吸收率 E_m 通常使用 Hagen-Rubens 公式近似计算^[23],表达式为

$$E_m \approx 2 \sqrt{\frac{c}{\lambda_0 \sigma(T)}}, \quad (1)$$

式中: c 表示光速; σ 表示直流电导率; λ_0 表示激光的波长; T 表示温度。

Hagen-Rubens 公式成立的前提是金属材料的折射率实部 n 等于折射率虚部 κ 的绝对值,这一结论仅在中远红外波段近似成立。随着激光波长的减小, n 与 κ 的差异逐渐增大,即通过 Hagen-Rubens 公式计算出的发射率误差越来越大,因此该公式仅适用于计算中远红外波段的发射率。根据材料手册可知^[24],室温下($T=300$ K)铜在 $0.6 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 波段的光谱发射率曲线,如图 1 所示。从图 1 可以看到,在大气透过窗口 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中红外波段,铜的发射率以及发射率的变化量均很小,发射率始终维持在 0.025 附近。

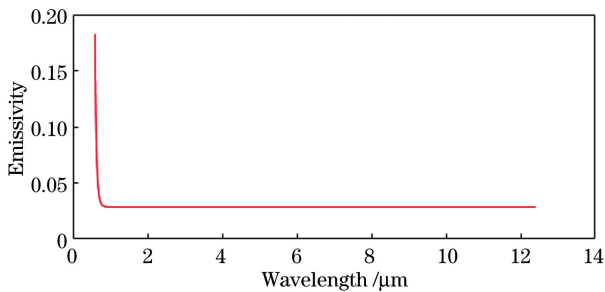


图 1 室温下铜的光谱发射率曲线

Fig. 1 Spectral emissivity curve of copper at room temperature

2.2 基于双温模型的铜薄膜表面 LIPSS 的形成理论

LIPSS 的形成机理现未有一个普适性的理论解释。对于铜等金属材料,可以使用表面漫反射波与入射波的相干模型(Sipe 模型)来解释^[25]。Sipe 模型将金属材料表面 LIPSS 的形成分为两个步骤:反射波和入射波在材料表面附近发生干涉,产生一个能量呈周期性分布的干涉场;在空间能量不均匀分布的牵引下,物质被软化并重新分布,从而产生周期性的波纹结构。在实际的研究中也观测到液相物质^[26],物质软化、液化和重新分布的过程可以由经典的双温模型来解释。在激光能量略小于材料损伤阈值的情况下,虽然晶格的温度未达到材料的熔点,但是在激光作用的时间内,电子温度超过了材料的熔点,当使用超短脉冲时,金属材料表面的电子温度可以达到 7000 K 以上。电子与晶格之间的能量传递可以使晶格的能量升高,所以部分晶格之间的联结被破坏,导致材料软化,甚至部分液化,而软化和液相后的物质在能量场的驱动下发生流动,最终产生周期性结构。

双温模型将物质对能量的吸收分为两个步骤^[27]:第一步是材料表面的电子吸收激光能量后导致电子温度升高,使得电子的热运动加剧;第二步是热电子与晶格的碰撞会将能量传递给晶格,直到电子与晶格之间达到热平衡。由于金属原子对外层电子的束缚力很弱,而且在金属材料的表面分布着大量的自由电子,因此金属对能量的吸收过程可以很好的由双温模型来描述。当入射激光的脉宽在纳秒及以上量级时,则在脉冲的作用时间内同时发生双温吸收和传统的傅里叶传热过程^[28],过程较为复杂。为了简化过程,选用飞秒脉冲作为入射激光,并用来研究铜的双温吸收过程。

经典的一维双温方程^[26]表达式为

$$\begin{cases} C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) - G(T_e - T_1) + s(z, t) \\ C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = G(T_e - T_1) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: C_e 和 C_1 分别为电子和晶格的热容; T_e 和 T_1 分别为电子和晶格的温度; k_e 为电子的热传导率; G 为电子与晶格的耦合系数; $s(z, t)$ 为激光源项,其中 z 为坐标, t 为脉冲作用时间。由于铜的费米温度 T_F (8.12×10^4 K) 远大于熔点 (1357.8 K),因此当 T_e 小于 T_F 时, C_e 与 T_e 满足^[26]

$$C_e = \gamma T_e, \quad (3)$$

式中: γ 为参数, $\gamma = \pi^2 n_e k_B / 2 T_F$,其中 n_e 为电子密度, k_B 为玻尔兹曼常数。表 1 为(2)式和(3)式用到关于铜的相关参数^[24],其中吸收率(E_{Cu})是在波长 λ 为 1064 nm 测得的。

表 1 铜的相关参数

Table 1 Relevant parameters of copper

Parameter	Value
$C_1/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	3.5×10^6
$G/(\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	1.02×10^7
$k_e/(\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	401
n_e/m^{-3}	8.5×10^{28}
T_F/K	8.12×10^4
Melting point(T_m)/K	1357.8
$k_B/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	1.380649×10^{-23}
Absorption depth(η)/nm	14.2
E_{Cu}	0.08

使用 COMSOL 软件对金属铜的双温模型进行仿真,设定初始温度为 300 K,将锁模 Nd:YAG 激光器泵浦的中心波长为 1064 nm 和脉宽为 100 fs 的单飞秒脉冲作用在铜片上。为了简化模型,对激光在空间和时间上进行理想化处理。激光在空间上是一个归一化后的高斯函数,峰值能量密度为 500 J/m^2 ;激光在时间上是一个理想的方波函数,下限为 0,高度为 1,宽度为激光脉宽。

使用短脉冲或超短脉冲烧蚀材料的研究中,常将电子与声子碰撞的弛豫时间作为一个区分尺度^[28],而电子与声子碰撞的弛豫时间是一个与材料特性和激光参数有关的物理量。金属铜的电子与声子碰撞的弛豫时间通常为十几个皮秒,大于激光脉宽,因此在脉冲作用的过程中传统的傅里叶传热过程尚未发生,所以靶材的能量吸收率保持不变。在单飞秒脉冲(能量密度为 5 J/cm^2 ,脉宽为 100 fs)的作用下,光斑中心位置的 T_e 和 T_i 与时间的关系如图 2 所示。从图 2 可以看到,当脉冲作用结束,即 $t=0.1 \text{ ps}$ 时, T_e 值迅速增大到 7073 K,而 T_i 值仍

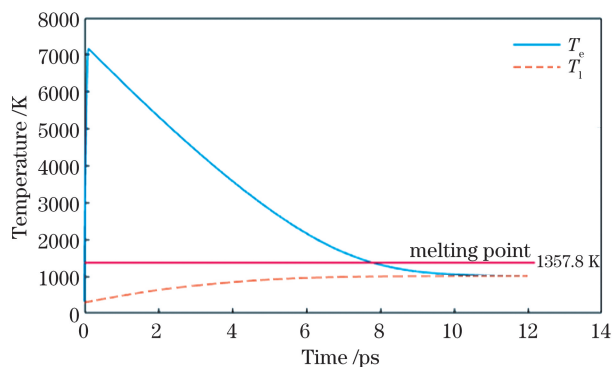


图 2 单飞秒脉冲作用下金属铜的双温方程曲线
Fig. 2 Double temperature equation curves of copper under single femtosecond pulse

维持在 300 K;随着时间的推移, T_e 值逐渐降低,并且下降速率逐渐减小,而 T_i 值则随着时间的增加缓慢增大;当 $t=12 \text{ ps}$ 时, T_e 值与 T_i 值达到平衡,平衡温度为 1017 K。整个过程中, T_i 值始终维持在 1357.8 K 以下,说明入射激光的功率密度小于纯铜的损伤阈值。在激光作用的绝大部分时间内,即 $t \leq 7.8 \text{ ps}$, T_e 值始终维持在 1357.8 K 以上。热电子与晶格的剧烈碰撞会破坏部分晶格之间的化学键,使得材料出现软化甚至部分液化的现象,这为软化和液相后的材料在能量场的驱动下重新排布打下基础。

在激光能量小于损伤阈值的作用下,铜薄膜表面在激光辐照区域的中心附近出现材料软化甚至部分液化的现象,这一结论可以解释软化和液相后的物质在能量场的驱动下发生流动而产生周期性结构的过程。

3 分析与讨论

3.1 激光诱导铜薄膜表面 LIPSS 的形成

相较于飞秒脉冲,纳秒脉冲在金属材料表面形成大面积 LIPSS 的效率更高^[29-30]。实验使用一台调 Q 的 Nd:YAG 激光器,激光器的中心波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns,最大的单脉冲能量为 800 mJ。LSFL 的条纹方向与激光偏振方向之间的关系是由薄膜的厚度决定的^[31]。当薄膜的厚度较薄时,LSFL 的条纹方向取决于基底材料,当薄膜的厚度较厚时,LSFL 的条纹方向取决于薄膜材料。实际的红外隐身工程中,受到使用条件的限制,金属薄膜必须达到一定的厚度方可使用。将融石英基底上厚度为 500 nm 的铜薄膜作为靶材,因铜薄膜的厚度较厚,所以预期 LISF 的条纹方向垂直于入射激光的偏振方向。

制备 LIPSS 的实验装置如图 3 所示,其中分束镜(BS)中透射光与反射光的能量比为 90%:10%,衰减片的系数为 0.1。旋转偏振片可以同时控制激光的偏振方向和能量,使用能量计可以实时监测入射单脉冲的能量,根据计算可以得到入射到靶材表面的单脉冲能量是能量计表头测得的 900 倍,测量得到靶材表面上的光斑直径为 8 mm。

旋转偏振片,使得入射到靶材上的激光单脉冲能量 $Q_s=200 \text{ mJ}$,采用等脉冲间隔、等单脉冲能量的多脉冲辐照于同一点的“S-on-1”方式作用 200 个脉冲。图 4 为光斑中心位置处靶材表面的微结构形貌。从图 4 可以看到,在激光的作用下,靶材表面产

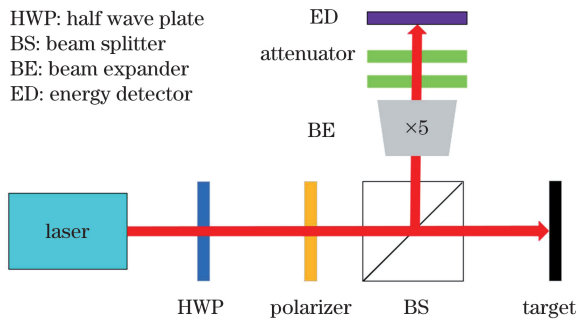


图 3 制备 LIPSS 的实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus for LIPSS preparation

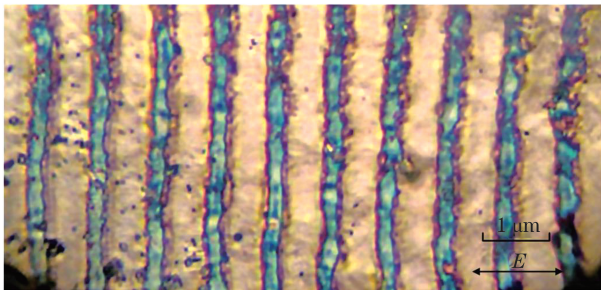


图 4 铜薄膜 LSFL 的形貌示意图

Fig. 4 Schematic of LSFL of copper film

生周期略小于波长且光栅方向垂直于入射激光偏振方向的 LSFL。

3.2 铜薄膜 LSFL 在中红外波段的发射率分析

使用 FDTD Solutions 软件搭建仿真模型, 使用

该模型对铜薄膜 LSFL 在中红外波段的发射率进行分析。

图 5 为铜薄膜 LSFL 的仿真模型。LSFL 的光栅齿是一个梯形正棱柱, 梯形的上底长度为 $0.4 \mu\text{m}$, 下底长度为 $0.3 \mu\text{m}$, 高度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。整个模型的长度为 $10.0 \mu\text{m}$, 宽度为 $5.0 \mu\text{m}$ 。由于模型面积远小于光斑, 因此可以将实际的高斯光束简化为平面波。波源的位置设置在模型上方 $0.5 \mu\text{m}$ 的位置处, 反射率监视器设置在监视器上方 $0.5 \mu\text{m}$ 的位置处, 透射率监视器设置在模型的下表面位置处。

中红外激光器泵浦激光的中心波长取决于非线性晶体的切割角度^[32], 因此通过改变晶体的切割角度可以在中红外波段实现任意波长激光的泵浦。设定入射激光的波长为 $3 \mu\text{m}$, 振幅为 1 V/m , 入射光垂直于模型上表面, 偏振方向垂直于 LSFL 方向。图 6(a) 和图 6(b) 分别为反射率监视器和透射率监视器测得的场强分布情况, 其中 E 为场强。从图 6 可以看到, 反射电场和透射电场均被光栅调制, 空间上的场强呈周期性分布; 反射场中, 电场强度的极大值在光栅的中心位置处; 透射场中, 电场强度的极小值在光栅的中心位置处。实验结果表明, 在光栅的中心位置处, 铜薄膜 LSFL 对波长为 $3 \mu\text{m}$ 激光的吸收率最小。

根据反射电场和透射电场的电场强度分布, 可

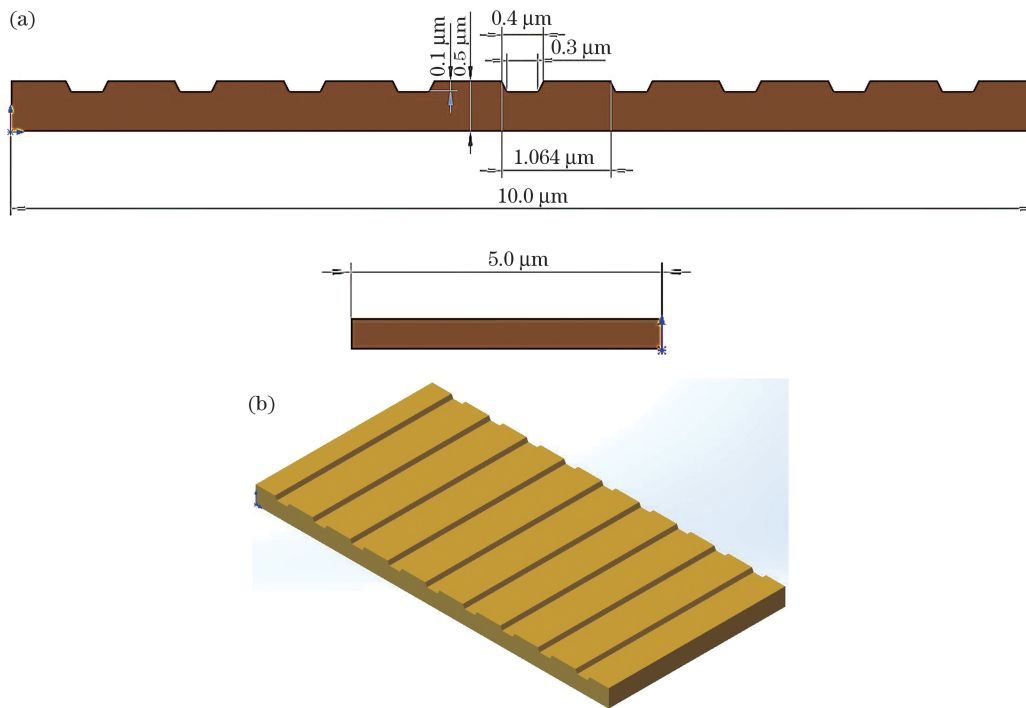


图 5 铜薄膜 LSFL 的仿真模型。(a) 截面示意图; (b) 三维模型图

Fig. 5 Simulation model of copper film. (a) Schematic cross section; (b) three-dimensional model diagram

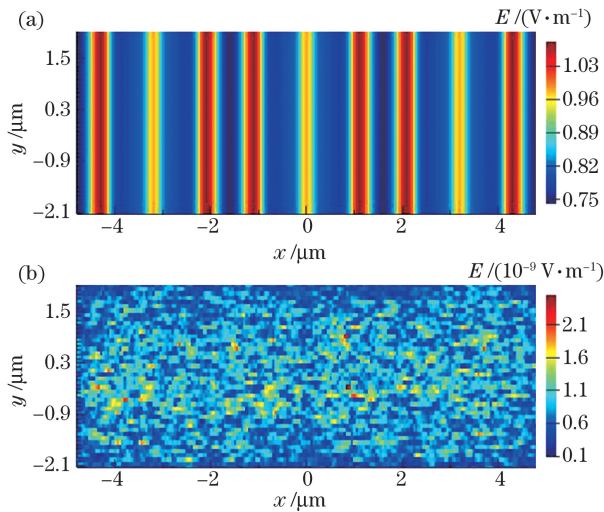


图 6 铜薄膜 LSFL 的电场分布示意图。(a) 反射电场；
(b) 透射电场

Fig. 6 Schematic of electric field distribution of LSFL of copper film. (a) Reflected electric field;
(b) transmitted electric field

以求得铜薄膜 LSFL 对波长为 $3 \mu\text{m}$ 激光的反射率为 0.634, 透射率近似为 0, 由此可以得到发射率为 0.356, 大于未含有 LSFL 的铜薄膜对波长为 $3 \mu\text{m}$ 激光的发射率(0.025)。

接下来对铜薄膜 LSFL 在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的发射率进行更进一步的研究, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看到, LSFL 的产生可以提高铜薄膜在这一波段的发射率, 但提升效果随着波长的增加而降低; LSFL 产生后, 使得铜薄膜在近红外和中红外波段内的发射率趋于稳定的阈值, 并产生一段向长波段的位移。在未含有 LSFL 的情况下, 当波长大于 $2 \mu\text{m}$ 时, 表面光滑的铜薄膜的发射率趋于 0.025, 当波长大于 $4.8 \mu\text{m}$ 时, 铜薄膜 LSFL 的发射率趋于 0.119。实验结果表明, LSFL 的产生可以提高铜薄膜在近红外和中红外波段的发射率。

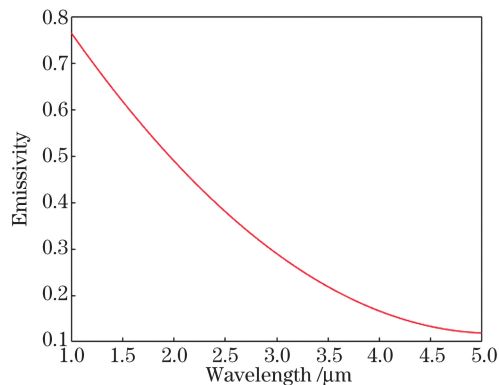


图 7 铜薄膜 LSFL 的发射率

Fig. 7 Emissivity of LSFL of copper film

4 结 论

首先采用理论计算的方法得到表面光滑的铜薄膜在近红外和中红外波段的发射率。基于 COMSOL 软件搭建略小于铜损伤阈值的飞秒脉冲烧蚀铜片的双温方程模型, 用来解释 LIPSS 形成过程中材料软化甚至液化的过程。使用波长为 1064 nm 的偏振纳秒脉冲在融石英的基底上厚度为 500 nm 铜薄膜的表面诱导产生 LSFL 结构。基于生成的 LSFL 结构搭建仿真模型, 分析铜薄膜 LSFL 模型的发射特性。模拟结果表明, LSFL 结构形成后, 铜薄膜在近红外和中红外波段的发射率得到大幅度提升, 对于较短波段的提升效果更为显著, 而且激光的发射率趋于稳定的阈值并向长波段移动, 稳定值由 0.025 提高至 0.119。

综上所述, 在铜薄膜表面诱导产生 LIPSS 可以大幅度提高其中红外波段的发射率, 进而实现铜薄膜对被动式中红外热探测器的隐身。

参 考 文 献

- [1] Gräf S, Müller F A. Polarisation-dependent generation of fs-laser induced periodic surface structures [J]. Applied Surface Science, 2015, 331: 150-155.
- [2] Hu Y W, Fan N N, Lu Y P, et al. LIPSS formed on the sidewalls of microholes in stainless steel trepanned by a circularly polarized femtosecond laser [J]. Applied Physics A, 2016, 122(7): 665.
- [3] Nigo F, Hashida M, Tsukamoto M, et al. Reflectance and crystallinity of silicon solar cells with LIPSS produced by XeCl excimer laser pulses [J]. Applied Physics A, 2020, 126(2): 129.
- [4] Shimizu H, Yada S, Obara G, et al. Contribution of defect on early stage of LIPSS formation [J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17990-17998.
- [5] Gregorečić P, Sedlaček M, Podgornik B, et al. Formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on tool steel by multiple picosecond laser pulses of different polarizations [J]. Applied Surface Science, 2016, 387: 698-706.
- [6] Martínez-Calderon M, Rodríguez A, Dias-Ponte A, et al. Femtosecond laser fabrication of highly hydrophobic stainless steel surface with hierarchical structures fabricated by combining ordered microstructures and LIPSS [J]. Applied Surface Science, 2016, 374: 81-89.
- [7] Varlamova O, Hoefner K, Ratzke M, et al. Modification of surface properties of solids by femtosecond LIPSS writing: comparative studies on

- silicon and stainless steel [J]. *Applied Physics A*, 2017, 123(12): 725.
- [8] Varlamova O, Reif J, Stolz M, et al. Wetting properties of LIPSS structured silicon surfaces [J]. *The European Physical Journal B*, 2019, 92(5): 91.
- [9] Vorobyev A Y, Guo C L. Enhanced absorptance of gold following multipulse femtosecond laser ablation [J]. *Physical Review B*, 2005, 72(19): 195422.
- [10] Ivanova E P, Hasan J, Webb H K, et al. Bactericidal activity of black silicon [J]. *Nat Commun*, 2013, 4: 2838.
- [11] Xing Y Q, Wu Z, Yang J J, et al. LIPSS combined with ALD MoS₂ nano-coatings for enhancing surface friction and hydrophobic performances [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125396.
- [12] Nürnberg P, Reinhardt H M, Rhinow D, et al. Controlled growth of periodically aligned copper-silicide nanocrystal arrays on silicon directed by laser-induced periodic surface structures (LIPSS) [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 420: 70-76.
- [13] Lai S, Lorenz P, Ehrhardt M, et al. Dot line pattern formation in photoresist films by mask-guided LIPSS formation due to excimer laser irradiation [J]. *Journal of Laser Micro*, 2019, 14: 2.
- [14] Ehrhardt M, Lai S, Lorenz P, et al. Guiding of LIPSS formation by excimer laser irradiation of pre-patterned polymer films for tailored hierarchical structures [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 506: 144785.
- [15] Landon S. Micro- and nano-processing using ultrafast lasers: all-optical enhancing [EB/OL]. [2020-07-13]. https://www.researchgate.net/publication/281567940_Micro_and_nano-processing_using_ultrafast_lasers_all-optical_enhancing.
- [16] Wen M Q, Sui X D, Huang X R, et al. Progress in research on metal membrane [J]. *Materials Review*, 2002, 16(1): 25-27.
文命清, 隋贤栋, 黄肖容, 等. 金属膜的研究进展 [J]. *材料导报*, 2002, 16(1): 25-27.
- [17] Sun W F, Hong R J, Tao C X, et al. Pulsed-laser-modified plasmon properties of metal nanofilms [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0103001.
孙文峰, 洪瑞金, 陶春先, 等. 脉冲激光改性金属纳米薄膜的等离子体特性 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0103001.
- [18] Deng Z C, Liu J D, Wang X, et al. Growth characteristics of Ag nanocrystalline thin films prepared by pulsed laser ablation in vacuum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0903003.
邓泽超, 刘建东, 王旭, 等. 真空环境中脉冲激光烧蚀制备纳米银晶薄膜的生长特性 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0903003.
- [19] Chen Y, Zhou X D, Zhou J, et al. Fano-resonance sensing mechanism of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic photonic crystal hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0413001.
陈颖, 周鑫德, 周健, 等. 亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0413001.
- [20] Wu C, Liu X X, Jiang D Y, et al. Preparation of metal Cu film and the research of the infrared emissivity properties [J]. *Surface Technology*, 2010, 39(2): 34-37.
吴春, 刘祥萱, 蒋大勇, 等. 金属铜薄膜的制备与红外发射率特性研究 [J]. *表面技术*, 2010, 39(2): 34-37.
- [21] Meng L L, Huang X M, Wang Q W, et al. Study on the conductive effectiveness of nanoscale copper films sputtered on the surface of polyester nonwoven fabrics [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2018, 109(11): 1395-1399.
- [22] Zhang J Q, Fang X P. *Infrared physics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
张建奇, 方小平. *红外物理* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [23] Sun C W, Lu Q S. *Laser irradiation effect* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. *激光辐照效应* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [24] Lide D R. *CRC handbook of chemistry and physics* [M]. 84th ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [25] van Driel H M, Young J F, Sipe J E. Laser induced periodic surface structure [J]. *MRS Proceedings*, 1982, 13: 197.
- [26] Pedraza A J, Guan Y F, Fowlkes J D, et al. Nanostructures produced by ultraviolet laser irradiation of silicon. I. Rippled structures [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2004, 22(6): 2823-2835.
- [27] Ni X C, Wang Q Y. Finite difference method for thermal analysis of femtosecond-picosecond pulse laser ablation on metal surface [J]. *Chinese Journal of 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.
- [28] Fang R R. *Dynamic research of high-energy laser ablation of target* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
房然然. *高能激光烧蚀靶材动力学研究* [D]. 武汉:

- 华中科技大学, 2009.
- [29] Elsayed-Ali H E, Norris T B, Pessot M A, et al. Time-resolved observation of electron-phonon relaxation in copper [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(12): 1212-1215.
- [30] Luo Z R, Li X, Shang J Z, et al. Modified rule of mixtures and Halpin-Tsai model for prediction of tensile strength of micron-sized reinforced composites and Young's modulus of multiscale reinforced composites for direct extrusion fabrication [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(7): 1-10.
- [31] Kim J, Na S. Metal thin film ablation with femtosecond pulsed laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(7): 1443-1448.
- [32] Kong H, Bian J T, Sun X Q. Calculation of phase-matching angles and effective nonlinear coefficients of BaGa₄Se₇ crystals [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 193: 163004.

Effect of Laser Induced Periodic Surface Structures on Infrared Emission Characteristics of Copper Films

Wang Tianyu^{1,2}, Bian Jintian^{1,2*}, Li Xin^{1,2**}, Kong Hui^{1,2}, Sun Xiaoquan^{1,2***}

¹ State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

² Anhui Key Laboratory of Advanced Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract

Objective Metal films have lots of excellent characteristics such as higher mechanical strength and damage threshold, better toughness, and thermal conductivity. They are widely used in modern optical industry. Moreover, copper films are used as infrared stealth material because the emissivity of copper is very low in mid-infrared band. This property can reduce the detection efficiency of passive mid infrared detector. The characteristic has extensive applications in military and many groups have performed research about it. However, they only focused on production of high quality copper film. However, the methods to destroy this film are ignored, which is presented in this paper. Laser-induced periodic surface structure (LIPSS) is special surface grating structures which is induced by polarized pulses that appear on nearly all kinds of solid materials. The period and direction of the grating only depend on the wavelength and polarized direction of laser. The structures can change the surface properties of materials such as super hydrophilic/hydrophobic, suppress the growth of the miscellaneous bacteria, as well as high emissivity. LIPSS has drawn attentions of many researchers. Lots of new materials with special characters have been produced by inducing LIPSS on the surface of the materials. However, the study of changing emission characteristics within mid-infrared band of metal films is lacking. Some researches are performed about the effect of LIPSS on infrared emission characteristics of copper films in this paper.

Methods First, the production of LIPSS on copper films is investigated using the surface interference between plasmons and incident laser model (Sipe model). The Sipe model involves two processing: softening and migration of materials. A two-temperature model is used to illustrate the copper-softening process. The theory of the two-temperature absorption of metals can be applied to all types of incident lasers because the processing is performed by the distribution of a large number of free electrons on the material surface, which is different from other types of materials. Therefore, a linear pulse at a center wavelength of 1064 nm with a pulse duration of 100 fs and energy density of 5 J/m² is used in the simulation experiment. Then, LIPSS is induced on a copper film that covered a quartz substrate using nanosecond linear pulses at a center wavelength of 1064 nm. Additionally, a simulation model is established according to the surface topography of the sample induced in the experiment. The emissivity is within the 1–5 μm band.

Results and Discussions The results of the two-temperature model experiment show that the temperature of the copper free electrons reaches 7073 K after the pulse introduction is finished, which is very much higher than the melting point of copper (1375.8 K). The high temperature softens the target, which means that materials can be rearranged under a periodic space electromagnetic field according to the Sipe model. Then, the temperature of the electronic system quickly decreases, whereas that of the lattice system gradually increases. At 12 ps, the

temperatures of the two systems are balanced at 1017 K, which is less than the melting point (**Fig. 2**), indicating that classical heat damage does not occur. LIPSS is induced by linearly polarized nanosecond pulses (**Fig. 4**). The direction of the gratings is perpendicular to the polarization direction of the laser. The results show that low surface-frequency LIPSS (LSFL) is induced on the film. The electric field distribution of the reflected and transmitted fields of the simulation model show that the laser is modulated by the gratings (**Fig. 6**). Therefore, the emissivity of the model can reach 0.365 and 0.119 when the laser wavelength is 3 μm and 5 μm , respectively (**Fig. 7**), which is very much higher than that of smooth copper (**Fig. 1**). The results show that LIPSS can improve the emissivity of copper films.

Conclusions This paper has presented three main studies. The first one is a brief explanation of how LIPSS can be induced by pulses lower than the damage threshold of materials. The Sipe model is used to describe the process of inducing LIPSS on metals. The material-softening step due to the pulses, whose influence is lower than the damage threshold, is achieved using a two-temperature simulation model. The second study induces LIPSS on a copper film over a quartz basement. The LIPSS is of LSFL type. The results agree with those in the previous studies. The third one proves that LIPSS can improve the emissivity of copper films through a simulation experiment. The results show that a much higher emissivity of films is achieved with LIPSS because the space electromagnetic field is periodically modulated by the micro gratings. The effect on the improvement is significant. These results show that inducing LIPSS on the surface of copper films is a feasible technique to destroy the stealth characteristics of a material in the mid-infrared band.

Key words laser optics; laser damage; laser-induced periodic surface structures; mid-infrared laser; emissivity; anti-invisible

OCIS codes 140.3330; 160.2120; 160.3900; 160.4236; 260.3060