



基于有限元分析法的激光退火铜基铌薄膜温度场模拟

王长霖 谭腾 熊平然 罗迪迪 朱同同 初青伟

Simulation on Temperature Field of Laser-annealed Copper-based Niobium Thin Film by Finite Element Analysis Method

WANG Changlin, TAN Teng, XIONG Pingran, LUO Didi, ZHU Tongtong, CHU Qingwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022086>

引用格式:

王长霖, 谭腾, 熊平然, 罗迪迪, 朱同同, 初青伟. 基于有限元分析法的激光退火铜基铌薄膜温度场模拟[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(4):541–546. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022086

WANG Changlin, TAN Teng, XIONG Pingran, LUO Didi, ZHU Tongtong, CHU Qingwei. Simulation on Temperature Field of Laser-annealed Copper-based Niobium Thin Film by Finite Element Analysis Method[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(4):541–546. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022086

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于ICEM-CFD的核噪声分析用有限元程序研究

Research of Finite Element Code for Nuclear Noise Analysis Based on ICEM-CFD

原子核物理评论. 2017, 34(3): 677–681 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.677>

硫化温度对ZnS薄膜生长质量的影响

Effect of Sulfurization Temperature on the Growth Quality of ZnS Thin Film

原子核物理评论. 2017, 34(3): 651–655 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.651>

格点QCD中有限体积下形状因子的内插计算

Lattice QCD Calculation of the Form Factor by Interpolation within Finite Volume

原子核物理评论. 2021, 38(2): 136–146 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021010>

有限玻色子系统中的激发态量子相变

Excited-state Quantum Phase Transitions in the Finite- N Boson System

原子核物理评论. 2018, 35(4): 487–492 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.487>

中子星内部强子-夸克相变的有限尺度效应研究

Hadron-quark Phase Transition with Finite-size Effect in Neutron Stars

原子核物理评论. 2017, 34(3): 509–513 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.509>

有限温下三维QED中费米子速度对费米子手征凝聚的影响 (英文)

Effect of Fermion Velocity on Fermion Chiral Condensate in QED₃ at Finite Temperature

原子核物理评论. 2017, 34(1): 16–19 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.01.016>

文章编号: 1007-4627(2023)04-0541-06

基于有限元分析法的激光退火铜基铌薄膜温度场模拟

王长霖^{1,2}, 谭腾¹, 熊平然¹, 罗迪迪¹, 朱同同^{1,2}, 初青伟^{1,†}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 铜基铌薄膜腔是一种基于纯铌腔发展而来的射频超导腔。新型铜基铌薄膜腔具有与纯铌腔相似的射频超导性能, 同时具备经济性、机械稳定性和热稳定性等方面的优势, 因此在射频超导领域具有广泛的应用前景。然而, 铜基铌薄膜腔的表面缺陷会引起额外的射频损耗, 需要在投入使用前进行表面后处理以消除表面缺陷。纳秒级高功率脉冲激光退火是一种新兴的腔体表面处理技术, 使用峰值功率流密度超过 100 MW/cm^2 的高功率、短脉冲激光局部再结晶表面, 可以减小材料表面粗糙度, 增大晶粒尺寸并消除部分表面缺陷, 以期获得更好的射频性能。目前, 在这方面选择的激光器主要是具有高功率的固体激光器, 其平均功率非常低, 在实际内壁表面积为 m^2 级的超导腔体上不具有实际应用意义。为解决此问题, 中国科学院近代物理研究所表面处理研究团队基于一台功率达 kW 级的纳秒脉冲光纤激光器建立了实用化的整腔激光处理系统。根据该系统的参数, 利用有限元分析法模拟研究了接近实际工况下材料表层与内部的温度分布, 并结合材料性质模拟了纯铌材料激光表面处理的效果。这项研究初步证实了使用纳秒级脉冲激光对超导腔内壁进行完整的退火处理是可行的, 为实现更好的射频超导性能提供了有效的方法。

关键词: 铜基铌薄膜; 激光退火; 射频超导; 有限元分析; 光纤激光器

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022086

0 引言

射频超导加速器^[1-2]是一种以超导加速腔体为主体, 采用射频超导技术加速带电粒子(如电子、质子或离子)的加速器。与传统加速器相比, 超导运行时功耗的优越性使其在经济和技术上具有巨大的效益。

传统超导腔^[3]采用纯铌研制, 因纯铌块材本身导热性差, 在 4.2K 下铌的热导率 ($100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) 远小于铜的热导率 ($600 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)^[4-5]。所以纯铌腔壁一般为 3~4 mm, 腔体对外界环境十分敏感, 机械稳定性较差。为了解决这些问题, 研究人员结合铜基底的高机械稳定性和高热导性能以及纯铌的良好低温射频性能, 发展了铜基铌薄膜腔^[6](也称镀铌腔)。但镀铌腔会随着加速梯度的上升, 出现品质因数迅速下降的现象 (Q -slope 现象^[7])。该现象成为了镀铌腔发展的主要限制因素。研究者^[8]认为 Q -slope 现象与铌膜质量有关, 铜基铌薄膜腔表面铌膜存在裂纹和气孔、表面粗糙度较大、晶界能过大等问题。上述因素制约了镀铌腔的射频超导性能,

因此整腔需进行后处理以改善其表面组织结构, 提高超导性能。

解决上述问题的一种途径就是对铌膜进行退火处理。超导腔的传统退火工艺之一是将材料整体加热至再结晶温度(一般为 $0.4 T_m$ 以上, T_m 是对应的材料熔点)以上, 再保温一段时间促使表面再结晶, 从而改善材料的晶粒尺寸, 消除组织缺陷。但由于铌的再结晶温度大于铜的熔点, 当铌发生再结晶时铜基底就已经被破坏, 所以传统退火工艺无法使用在镀铌腔上。激光退火工艺^[9-10]是目前被广泛用于薄膜处理的一种新兴手段, 在半导体和低熔点金属行业中十分常见, 但被用于铌这类高熔点金属的研究却较少。

关于铜基铌薄膜及其后处理的研究, 20世纪80年代欧洲核子研究中心(CERN)^[11]科研团队发明了铜腔镀铌技术, 2006年CERN团队采用磁控溅射的方法用高频铜腔作为基底, 在铜腔的内表面镀一层 1~2 μm 厚的铌薄膜, 从而在低温下实现超导。1995年Radicioni等^[12]提出用准分子激光器(XeCl)对铜基铌薄膜进行表

收稿日期: 2022-09-23; 修改日期: 2022-12-22

基金项目: 甘肃省科技计划项目(20JR5RA553); 中国科学院青年创新促进会

作者简介: 王长霖(1999-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 攻读方向为材料与化工; E-mail: wangchanglin21@mails.ucas.ac.cn

†通信作者: 初青伟, E-mail: chuqingwei@impcas.ac.cn

面退火。研究发现,薄膜熔融结晶之后的性能提升,晶粒钕薄膜的晶粒尺寸增加,氧含量降低,RRR值由18增加到22.7。但由于准分子激光器技术比较落后,在该文实验条件下退火效果并不理想,会有类似“太阳喷发”^[13]现象出现,钕膜容易被破坏,故该技术最终没有应用于铜基钕薄膜腔。如今激光技术飞速发展,2020年北京Yang等^[14]继续对铜基钕薄膜的激光退火工作展开研究,其团队使用的Nd:YAG固体激光器激光脉宽为6 ns,光斑直径6 mm,单脉冲能量600 mJ内可调,频率1~10 Hz可调。经激光退火处理后,钕膜的粗糙度降低、缺陷减少,超导转变温度提升至9.3 K,这一温度与纯钕腔基本一致。但是在上述激光退火研究中,激光的处理速率仅为 $2.8 \text{ cm}^2/\text{s}$,在实际工业生产中花费的时间较长,还不具备工业大规模处理的能力。本文高功率纳秒脉冲激光退火纯钕样品采用的是kW级纳秒脉冲光纤激光器,区别于准分子激光器和固体激光器,其功率更大,脉宽、频率可调范围更广,其处理速率可以达到 $500 \text{ cm}^2/\text{s}$,远高于前者,有望实现对镀钕腔的工业化高效率大规模处理。

在对镀钕腔进行激光退火的过程中,需要选择适当的激光能量密度,从而达到对钕层退火而不及铜基底的目的,这是因为材料与激光相互作用的短时间内表面吸收大量热,这些热量向周围扩散的程度可以忽略不计,且表面冷却到室温的速度极快。图1展示的是羊宇佳团队做的温度场模拟结果,其材料表面最高温度与能量密度的关系如图所示,他们推测退火处理时能量密度在 $1.21\sim 2.57 \text{ J}/\text{cm}^2$ 较为合适。基于上述研究,本文从单次激光扫描条件出发,使用有限元模拟软件计算了激光处理钕膜表面的温度场分布,给出了对铜基钕薄膜采取激光退火工艺应采用的参数设置,从温度场变化的角度分析了整个退火过程,经过横向对比,显示了高功率纳秒脉冲光纤激光器在镀钕腔后处理上的优势。在此之前,

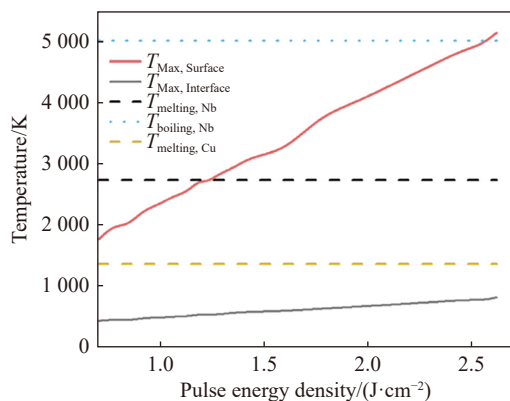


图1 固体激光器处理下表面最高温度与能量密度的关系^[14](在线彩图)

激光退火铜基钕薄膜的相关研究较少,在运用有限元方法件对相关过程的仿真分析上,本文也有望提供参考。

1 纳秒脉冲高功率激光退火平台

为实现高效率激光退火,中国科学院近代物理研究所表面处理团队搭建了一套以kW级纳秒脉冲光纤激光器为基础的激光退火系统。

系统使用深圳水滴激光科技有限公司的HL1000-RMP2红外纳秒脉冲光纤激光器,固定参数激光光斑边长1 mm,脉宽25 ns,频率2~50 kHz内可调,单脉冲能量在100 mJ范围内可调,中心波长1064 nm。参照实验条件(表1)对样品进行表面退火,模型设置如下。

表1 激光器参数设置

参数	大小
单脉冲能量	100 mJ内可调
光斑长度	1 mm
脉宽	25 ns
频率	2~50 kHz

激光退火光路设计用到F200 mm复合镜片准直镜、动态反射镜、高速旋转电机、动态聚焦电机和动态反射镜电机等主要部件。钕腔视为轴向对称结构,将其横向分为五部分,激光头沿着钕腔中轴线移动时,需要激光处理区域的内径持续变化,同时待激光处理内腔表面沿中轴线的角度相对中轴线持续变化。因此,为保证激光光斑表面积在待处理内腔表面始终保持一致,采用上述三套电机。高速电机控制脉冲和脉冲重叠率,动态聚焦电机控制光斑直径保持光斑直径不变,动态反射电机保证激光与内腔待清洗区域始终保持90度直角,其光路图如图2所示。采用F200 mm的原因是其在满足动态聚焦需求下保证光斑可以聚焦在1 mm以下。激光头由机械手夹持,沿着钕腔中轴线匀速从入口处向内推进,在推进过程中,动态聚焦镜电机与动态反射镜电机实时改变位置,实现三轴联动,确保激光照射在腔内部任意位置均为垂直角度,且光斑尺寸保持一致,针对性地解决了激光在复杂环境下覆盖不均匀的问题。于此同时,整个机构高速旋转,覆盖腔内轴向周圈内所有局部需照射部位。由于轴对称结构,处理完半边钕腔后,将激光头从钕腔另一入口伸入,重复以上激光处理步骤,分两步完成整腔激光处理。

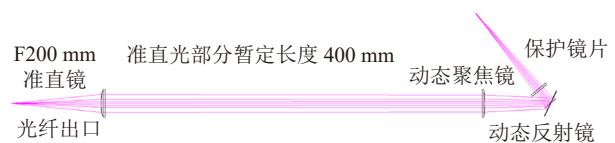


图2 激光退火光路图(在线彩图)

2 激光退火仿真

2.1 激光退火原理

针对铌的激光退火，本文考虑两种退火原理：

第一，激光加热使表面温度至铌再结晶温度以上，熔点以下，铌晶粒在受热过程中发生再结晶，由于初始位错、晶界较多，初始晶核易于在晶界上(也有可能其他缺陷上)形成，再结晶将从这些位置开动，推测温度越高，再结晶粒径越大。退火结束后内应力消除，材料组织缺陷减少。第二，激光能量输出持续加大，表面温度升至铌熔点以上，使铌膜熔化重结晶，即发生相变重结晶退火。

两者相比，再结晶退火效果一般比重结晶的更好，所以在退火中要控制能量输出，尽量避免发生相变。但考虑到激光器的能量可调范围大，能量输出较高时可能会导致铌膜熔化，模拟过程中加入了相变模块。

如图 3 所示，激光作用形式可分为热吸收、热辐射、热扩散三部分，将热辐射和热扩散都看作能量损失，铌膜获得的能量仅来自热吸收，材料通过热吸收而不断升温。其中热吸收与材料的吸收率有关，常温下铌对 1 064 nm 波长的光吸收率约为 0.2，且随温度不断变化。热辐射与表面辐射率有关，本文参考值为 0.03。热扩散包括热传递和热交换，与材料属性和环境温度有关。其关系式将在 2.3 节中给出。

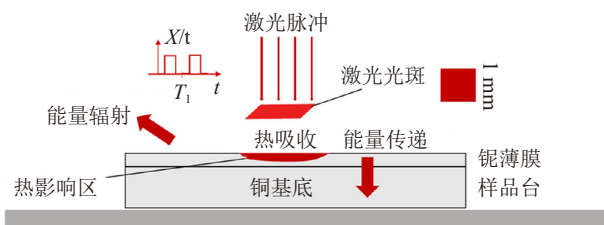


图 3 激光退火样品处理平台示意图(在线彩图)

2.2 光斑设置

目前市场上的光纤激光普遍有单模与多模两种模式，本文采用的激光器激光类型为多模。单模激光的能量输出满足高斯分布，高斯分布中每个脉冲都存在明显上升沿和下降沿，最大值为脉冲峰值。而本文激光器出射激光(多模)光强分布可近似看作平顶光，脉冲较为稳定，能量分布均匀。

平顶光指光斑的能量在作用范围内均匀分布，其物理形式可以表示为

$$f(x,y)=A(x,y)=A_0; \quad (1)$$

高斯光斑能量分布呈正态分布，其物理形式为

$$f(x,y)=A_0 \exp \left[- \left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right) \right], \quad (2)$$

其中： x_0 和 y_0 表示光斑圆心坐标； x,y 代表空间任意位置； σ_x 和 σ_y 为标准差，为激光脉宽的一侧上升沿长度； A_0 表示激光的能量振幅。高斯光处理时效率较低，易损伤材料，而平顶光能量输出稳定，使材料表面受热更加均匀，损伤性小，效率更高。

2.3 固体传热设置

纯铌是一种熔点高、导热性差的金属，其密度、热容和导热系数受温度影响，即随退火进行上述材料属性不断改变，变化规律如表 2 所列。

表 2 模拟中的各项材料参数设置^[15]

参数	状态	
	固态	液态
密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$8\,617.45 - 0.14T - 8.08 \times 10^{-5}T^2$	$8\,580.66 - 0.23T$
恒压热容 C_p ($\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$)	$236.95 + 0.106T - 6.08 \times 10^{-5}T^2 + 1.90 \times 10^{-8}T^3 + 2.35 \times 10^5 T^{-2}$	$360.28 + 5.38 \times 10^{-8}T - 5.24 \times 10^{-13}T^2 - 4.89 \times 10^{-16}T^3 + 624.28T^{-2}$
导热系数 k ($\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$)	$48.67 + 0.016T - 6.37 \times 10^{-7}T^2$	$47.23 + 0.008T$

热吸收过程的热传递方程可以表示为

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q + Q_{\text{led}}, \quad (3)$$

上述表达式中： ρ 表示材料密度； C_p 为材料恒压热容； u 表示表面熔化流动的速度场； T 表示环境温度； Q 表示热源热量； Q_{led} 表示表面传递热量； q 是热传递矢量；可以写成：

$$q = -k \nabla T. \quad (4)$$

若材料表面温度升高至相变点 T_m 时将发生固液相变，由固态转变为熔融态，铌达到熔点后金属键作用会逐渐减小，使其无法保持晶体状态，该过程不断吸收能量，熔化并非瞬间完成，具有一定持续性，理论上此时温度保持不变，直到激光作用区材料完全熔化为止。该物理过程可表示为

$$c_p = \theta_1 c_{p,1} + \theta_2 c_{p,2} + L_{12} \frac{da_m}{dT}, \quad (5)$$

其中

$$a_m = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2 + \theta_1}, \quad (6)$$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2, \quad (7)$$

θ_1 和 θ_2 分别代表固相和液相占现有体系的百分比, $\theta_1 + \theta_2 = 1$; L_{12} 是熔化潜热; k_1 和 k_2 分别是固相和液相的热传递系数。在理论条件下, 材料发生相变的过程中温度不变, 即 $\Delta T = 0$, 而模拟软件计算为了数值收敛, ΔT 不能为 0, 且为了减小计算量, 从较大 ΔT (如 300 K \rightarrow 200 K \rightarrow 75 K) 逐步递减使其无限趋近与 0。表面辐射和热对流都看作能量损失, 其方程表示为

$$-nq = \epsilon\sigma(T_{\text{amb}}^4 - T_t^4), \quad (8)$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T_t) - nq = q_0, \quad (9)$$

在表面辐射方程中: ϵ 表示铌材的环境辐射率; σ 是 Stefan-Boltzmann 常数; T_{amb} 表示环境温度; T_t 为材料

内部温度, 是与时间有关的函数; 在热对流方程中, T_{ext} 表示外部温度; h 为传热系数; n 是常数; q 是热传递矢量; q_0 为沿热传递矢量方向 q 传递的总热量。

3 激光退火仿真结果分析

3.1 温度场分布

模拟实验选取热通量面为边长为 1 mm 的方形斑, 作用面及其周围温度场随时间发生变化, 分为温升阶段(熔化相变)和冷却阶段。在此过程中表面瞬时最高温度反映了材料整体状态, 若最高温度超过铌熔点, 材料将进入固液共存状态, 可以利用探针工具取得材料表面瞬时最高温度, 探针工具是仿真软件中自带的功能, 能够记录材料全域内每一时刻的温度, 结果如图 4 所示。

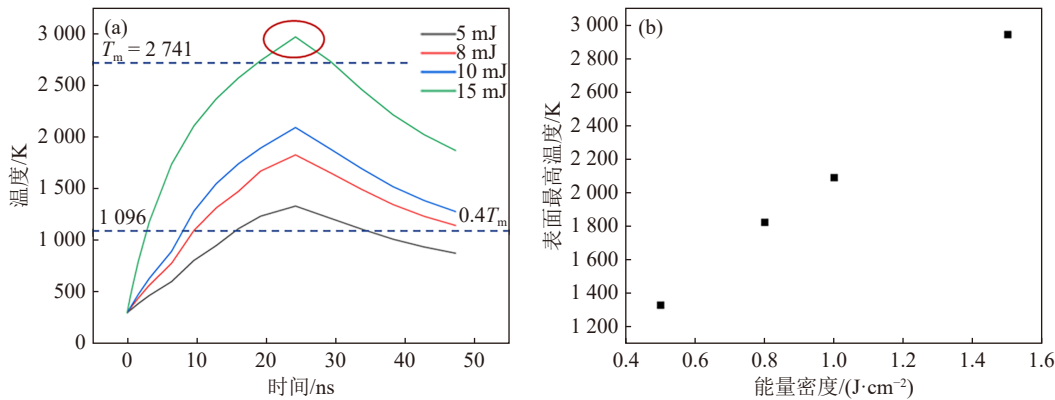


图 4 模拟脉冲作用下的铌膜表面温度变化曲线(在线彩图)

(a) 不同脉冲能量下的铌膜温度变化曲线; (b) 退火过程中表面的最高温度。

图 4(a) 反映了材料温度随时间的变化情况, (b) 反映了对应能量输出下铌膜能够达到的最高温度。模拟得到的铌膜表面温度场曲线显示, 脉冲能量越大, 表面温度越高。一个脉冲周期结束时刻, 温度会下降至 400 K 左右。对比 Yang 等退火工作中所使用的 Nd:YAG 激光器模拟数据 [图 1 和图 4(b)], 本文高功率纳秒脉冲激光器在退火处理温度场方面与其提供的数据基本一致。在相同能量密度作用下, 表面最高温度会略低于固体激光器的。例如 12 mJ/mm^2 下, 高功率纳秒脉冲光纤激光器得到的表面最高温度约为 2400 K 左右, 而固体激光器做出的结果大约在 2500 K 左右, 其原因在于固体激光器易受外界环境影响, 光束质量易受干扰, 而纳秒脉冲光纤激光器的光束更稳定, 与平顶光基本一致, 不存在高斯斑的峰值点 [见图 5(a)], 从而同一平面受激光作用更均匀, 故在同一能量密度下, 我们的表面最高温度较低。

能量密度可根据激光单脉冲输出由下列公式计算

得到:

$$\rho_e = \frac{E}{S}, \quad (10)$$

其中: S 为激光光斑作用面积; E 表示单脉冲激光能量。当输入能量过高时, 表面最高温度超过铌的熔点, 表面铌膜会于图 4(a) 红圈位置内发生熔化, 形成熔池。

此外, 截面热影响区的过渡十分均匀, 如图 5(b) 所示, 可见 $0.7 \mu\text{m}$ 内温度较室温有明显变化, 达到再结晶温度以上的深度在 200 nm 以内。而铌膜厚度一般在几个微米, 铜基底和基膜结合处的温升极小, 基膜结合处结合力主要为分子间作用力, 当温度上升时结合处产生热应力, 会导致键合断裂破坏结构, 而此处温升不足以产生破坏结构的热应力, 故使用脉冲光纤激光器退火铜基铌薄膜并不会破坏原有基膜结合结构。我们认为采用该激光器退火镀膜腔对铜基底的影响可忽略不计。

就模拟数据而言, 使用纳秒脉冲光纤激光器不会生成深的热影响区, 处理过程中铜基底不受影响。由于光

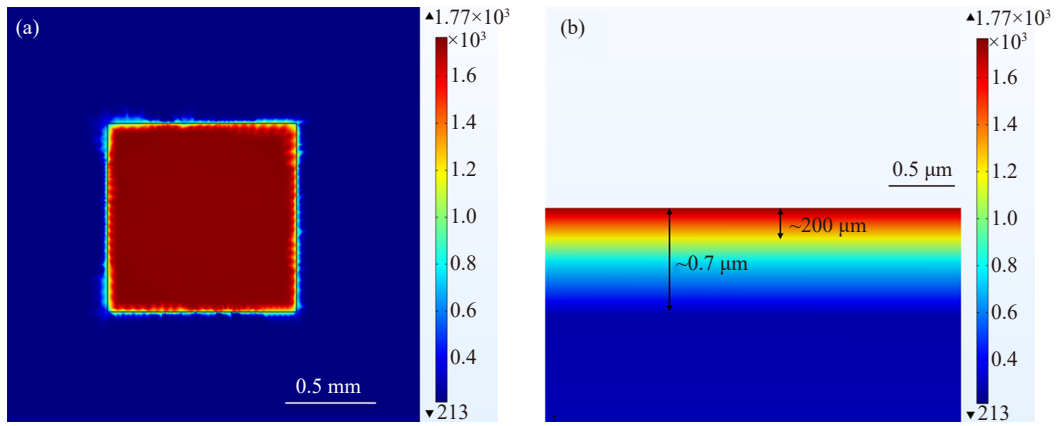


图 5 8 mJ 脉冲能量激光作用结束时材料的表面温度场分布 (在线彩图)

(a) 表面温度场分布; (b) 截面温度场分布。

纤激光器功率更大的特点，完全能够在同一时间内处理更大的区域。

3.2 再结晶过程

材料表面被激光能量烧蚀，温度会不断上升，而一个脉冲周期为 20 μs，此周期内剩余时间表面不受激光作用，只与环境产生热交换，材料表面温度呈下降趋势。

冷却初期，光斑区域内的铌仍处于再结晶温度以上。当表面温度降至再结晶温度时，不再生成新的晶核，再结晶过程达到尾声。我们将铌膜“温度上升-生成新晶核-晶核长大-生成新晶粒”的过程称为铌膜的再结晶过程，激光退火的关键就在于此过程，再结晶完成后，温度持续下降至本次激光脉冲周期结束，结束时刻的温度可降至 400 K 左右。

理想状态下，再结晶过程中晶核的形核功与晶核临界半径遵循如下物理公式：

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\sigma_s T_m^2}{3(L_m \Delta T)^2}, \quad (11)$$

$$r^* = \frac{2\sigma_s T_m}{L_m \Delta T}, \quad (12)$$

$$\Delta T = T_m - T_n, \quad (13)$$

其中： ΔG^* 为形核功， σ_s 为晶胚单位面积表面能； T_m 为熔点温度； L_m 为熔化潜热； ΔT 为过冷度。退火温度越高， ΔT 越小，再结晶晶粒越大；反之，退火温度越低，晶粒越小，由表层往下，热影响区内晶粒尺寸应是由大变小。可以适当提高退火温度以达到增大晶粒的目的，再结晶的晶核会从晶界等缺陷处开始形成并长大，使铌膜表面组织变得致密，减少了晶界和位错，从而达到了退火目的。

4 总结与展望

本文以 kW 级红外纳秒脉冲光纤激光退火平台为基础，使用有限元模拟软件建模，将实际激光器所使用的参数代入，通过有限元方法计算得到了激光退火铜基铌薄膜过程的温度场分布。经过模拟温度场数据的横向对比发现：使用纳秒脉冲激光器对镀膜腔内壁进行激光退火处理所达到的效果与固体激光器处理的效果相仿，且自身更高的功率带来了退火效率上的提升。这一结果证明了高功率纳秒脉冲激光对铜基铌薄膜激光退火的可行性和优越性。

本文激光退火对材料表面改性的主要原理是铌的再结晶，由于光纤激光器可以使膜浅层百纳米深度范围内形成热影响区，影响区内铌晶粒受热发生再结晶，能够达到消除晶界和位错、降低表面能、减小材料表面粗糙度的目的。激光退火能量仅沉积在表面的情况有效避免了基膜结合被破坏，而不用担心退火过程中薄膜脱落的问题。

基于有限元法，本文在特定条件下得到了较为可靠的单脉冲激光退火温度场分布；针对实际实验中退火过程温度的变化情况，该模型可以给出合理的推断，解决了激光退火在极短时间内温度变化难以被测量的问题；且模拟结果对后续实验也具有一定指导作用。本次模拟展示的是表面受一次脉冲作用的结果，在上述条件下，脉冲能量密度是控制退火效果的关键因素。实际对铌腔退火，还要控制激光的扫描路径、扫描速度以及扫描次数。在该次模拟的基础上，我们将继续构建铜基铌薄膜激光退火连续扫描模型，进行激光退火实验验证，进一步优化激光退火工艺参数，最终提高激光退火效率，实现工业化镀膜腔内壁的表面清洗。

参考文献:

- [1] PADAMSEE H. *Superconductor Science and Technology*, 2017, 30(5): 053003.
- [2] KEPHART R, CHASE B, GONIN I, et al. Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015: 1467.
- [3] PROCH D. *Reports on Progress in Physics*, 1998, 61(5): 431.
- [4] CHANDRASEKARAN S, BIELER T, COMPTON C, et al. Comparison of the Role of Moderate Heat Treatment Temperatures on the Thermal Conductivity of Ingot Niobium[C]//AIP Conference Proceedings: volume 1352. American Institute of Physics, 2011: 131.
- [5] BRECHNA H, HARTWIG G, SCHAUER W. Cryogenic Properties of Metallic and Nonmetallic Materials Utilized in Low Temperature and Superconducting Magnets.[C]//Proceedings of the 8th International Conference on High-Energy Accelerators, CERN 1971./Blewett, M. Hildred (ed.). Geneva European Organization for Nuclear Research (1971). Kernforschungszentrum, Karlsruhe, Ger, 1971.
- [6] PADAMSEE H. *Superconductor Science and Technology*, 2001, 14(4): R28.
- [7] AULL S, VENTURINI DELSOLARO W, JUNGINGER T, et al. On the Understanding of q-slope of Niobium thin Films[Z]. 2015.
- [8] PALMIERI V, VAGLIO R. *Superconductor Science and Technology*, 2015, 29(1): 015004.
- [9] ZHANG J, SONG B, WEI Q, et al. *Journal of Materials Science Technology*, 2019, 35(2): 270.
- [10] BAI Feng, ZHAO Zhongquan. *Laser Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 1. (in Chinese)
(柏锋, 赵全忠. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 1.)
- [11] BENVENUTI C, CIRCELLI N, HAUER M. *Applied Physics Letters*, 1984, 45(5): 583.
- [12] RADICIONI E, BENVENUTI C, BIANCONI M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1995, 365(1): 28.
- [13] HOLMAN G D. *Physical Today*, 2012, 65(4): 56.
- [14] YANG Y, LU X, TAN W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2020, 964: 163803.
- [15] CHASE M W, (US) N I S O. Nist-janaf Thermochemical Tables: Volume 9[M]. Washington D C: American Chemical Society 1998.

Simulation on Temperature Field of Laser-annealed Copper-based Niobium Thin Film by Finite Element Analysis Method

WANG Changlin^{1,2}, TAN Teng¹, XIONG Pingran¹, LUO Didi¹, ZHU Tongtong^{1,2}, CHU Qingwei^{1,†}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Copper-based niobium thin film cavity is one kind of superconducting radio frequency(SRF) cavities developed from bulk niobium cavity. This new type of cavity has similar SRF properties to the pure niobium cavities but is more economical, mechanically stable, and thermally stable, making it promising for industrial SRF applications. However, the inevitable surface defects of niobium film on the surface of Nb/Cu cavities induce extra power dissipation, and require post-treatment before cavity operation. Near-surface annealing of SRF cavity by nanosecond high-intensity pulsed laser is an emerging surface treatment technology for SRF cavity. Using high power and short pulsed laser with peak power flux exceeding 100 MW/cm^2 to locally recrystallize the surface can reduce the surface roughness, increase the grain size and eliminates some surface defects, so as to obtain better surface RF properties. At present, the type of laser selected in this direction is mainly the solid-state laser with high peak power, which has a very low average power, not practical for the actual superconducting cavity with an m^2 inner wall surface area. To solve this issue, a whole-cavity laser processing system based on a kW-level power nanosecond pulse fiber laser has been established by the Surface Treatment Research Team of the Institute of Modern Physics. In this study, finite element simulation was conducted with the parameters of the system to investigate the temperature distribution on the surface and inside the material under near-actual working conditions. Combined with the material properties, the laser surface treatment effect of pure niobium material was simulated. This study preliminarily confirms the feasibility of using nanosecond pulse laser for complete annealing of the inner wall of superconducting cavities, and provides an effective method for achieving better RF superconducting performance.

Key words: copper-based niobium thin film; laser annealing; RF superconductivity; finite element analysis; fiber laser

Received date: 23 Sep. 2022; Revised date: 22 Dec. 2022

Foundation item: Natural Science Foundation of Gansu(20JR5RA553); Youth Innovation Promotion Association, CAS.

† Corresponding author: CHU Qingwei, E-mail: chuqingwei@impcas.ac.cn