

·光电器件与材料·

激光辐照下硅材料温度分布研究

韩微微¹, 赵万利²

(1. 中国电子科技集团公司第四十五研究所, 北京 100176; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 激光加工硅材料过程中产生的热效应现象对产品良率有不良影响。为了降低热效应现象的影响, 对激光辐照硅材料表面时硅材料的温度升高与分布情况进行了研究。使用光纤连续激光器作为光源辐照硅材料表面, 记录了硅材料在不同激光功率密度和照射时间情况下的温度升高与分布情况, 得到了实验数据。并根据实验条件和参数进行了仿真建模和模拟计算, 得到了激光辐照下硅材料温度分布模型, 该模型仿真数据与实验结果基本吻合, 可通过修改该模型参数进行激光加工进行模拟实验, 为激光加工时的参数选择提供了实验依据。

关键词: 激光技术; 激光加工; 硅材料; 热效应; 温度场分布

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-04-0008-03

Research on Temperature Distribution of Silicon Material Irradiated by Laser

HAN Wei-wei¹, ZHAO Wan-li²

(1. The 45th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100176, China;

2. Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: The temperature rising and distribution of silicon material irradiated by laser are researched for reducing the influence of heat effect. A fiber continuous laser is used as a light power to irradiate silicon material surface to record the temperature rising and distribution of silicon material under different laser power density and irradiation time. And experimental data is obtained. According to experimental conditions and parameters, simulation and calculation are performed to get the temperature distribution model of silicon material under laser irradiation. The simulation data of the model accords with the experimental results. Laser cutting simulation experiment can be performed through correcting the parameters of the model, which provides experimental reference for parameter choosing during laser cutting.

Key words: laser technology; laser cutting; silicon material; heat effect; temperature field distribution

随着激光技术的发展, 激光加工技术正在得到广泛应用。在半导体领域, 由于激光加工具有制造成本低, 效率高, 灵活性好, 清洁、安全, 节能和节省材料, 无污染等特点, 而广泛用于对半导体器件的硅基底进行切割。在激光切割硅材料时, 加工产生的热效应可能会对器件性能产生不良影响, 从而影响生产产品的良率。热作用成为激光与半导体材料相互作用中最重要的物理效应之一, 因此研究激

光对典型的半导体硅材料的热作用具有非常重要的意义^[1-6]。为了对热效应现象进行研究, 采用普遍应用于激光切割的半导体连续光纤激光器作为光源辐照硅材料表面, 监视其温度分布及随时间变化情况, 并据此建立数学模型, 进行了数值仿真模拟。仿真结果与实验结果基本一致, 得到了比较满意的结果。

收稿日期: 2015-07-17

作者简介: 韩微微(1981-), 女, 硕士, 主要从事激光加工、激光应用和激光器技术研究; 赵万利(1981-), 男, 硕士, 主要从事激光与物质作用研究。

1 激光切割原理

激光切割时利用激光束聚焦形成的高功率密度光斑,将材料快速加热至汽化温度,蒸发形成小孔洞后,再使激光束与材料相对移动,从而获得较为狭窄的连续切缝。通过与数控机床,计算机辅助设计软件相结合,预先在计算机内设计切割轨迹,可以实现复杂的各种轨迹切割。

图1显示了激光切割装置的示意图。激光传输过程中,扩束镜起到激光束整形作用。

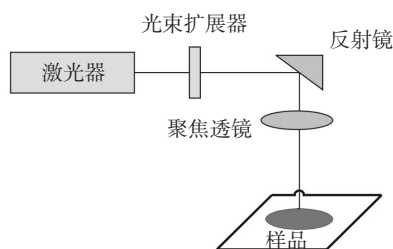


图1 激光切割装置示意图

在切割过程中,切割面的硅材料会因为激光辐照温度升高而改变特性,进而影响硅材料上的器件性能。该现象被称为激光热效应^[2-4]。

2 实验设计与数据分析

激光加工时产生的热效应与激光波长、工作模式、激光功率密度、激光作用在硅材料上的时间等参数有关。为了研究激光作用在硅材料表面时硅材料温度情况,设计实验光路如图2所示。

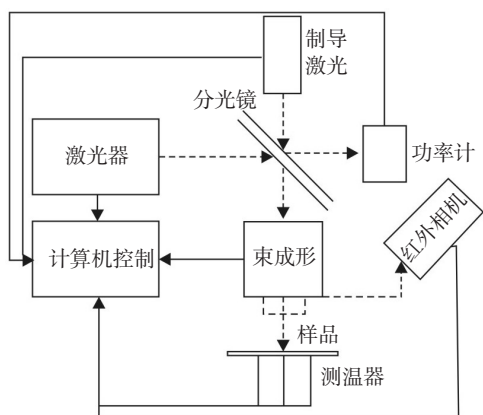


图2 连续激光辐照硅材料实验示意图

此次实验在激光加工平台上开展,采用激光切割设备应用较为广泛的连续光纤激光器作为光源,波长为1 080 nm,激光器出口光斑大小约为1 mm,

模式为TEM₀₀,激光器功率连续可调,工作激光经过半反半透镜与指示光同轴合束,便于光路调节。半反半透镜对1 080 nm激光反射率为97%,透过率为3%,能量计用于检测输出激光功率。光束整形系统可对光束进行扩束和压缩,为了便于监测,本实验采用扩束处理,激光扩束后到达样品的光斑直径为5 mm。为了更好的进行温度检测,没有使用聚焦镜进行聚焦,光束垂直辐照硅材料的中心。热像仪观察样品温度的变化。此次实验样品为硅材料,半径为50 mm,厚度为4 mm。

实验首先测试了不同到靶激光功率条件下,硅材料中心的温升变化情况。材料中心温度随激光辐照时间变化曲线如图3所示。图中的激光功率指经过折算后的到靶激光功率,材料的吸收率为60%。

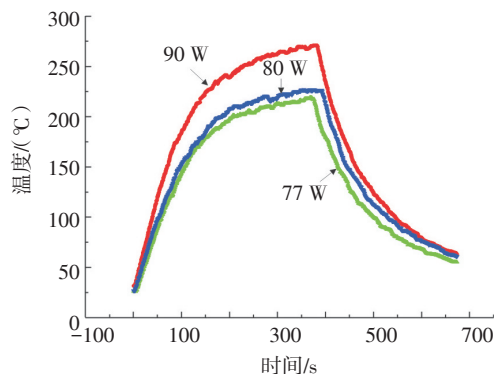


图3 硅材料在不同功率激光作用下的温升曲线

从图3中可以看出,激光刚开始辐照硅材料时,硅材料将吸收的激光能量转化为热能,温度迅速升高,材料温度上升曲线基本为直线。激光功率越高,温升曲线斜率越大。这是由于材料的初始温度较低(环境温度27 °C),材料与周围环境的热交换以吸收激光能量为主。随着激光作用时间的增加,温度上升趋势逐渐变为平缓,这是因为温度较高时,硅材料对环境的热辐射作用也逐渐增大,吸收的能量通过与空气的对流换热而交换出去,持续辐照会使硅材料达到一定的热平衡状态。当激光辐照停止后,硅材料失去热源,自然冷却,以对环境的热辐射作用为主,温度开始下降,降温的斜率与环境温度及对流条件相关^[7-9]。

为了监测样品表面不同区域的温度分布,在硅样品的背面接三个热电偶,用于实时监测样品的温升,因材料较薄,忽略热量在径向上的热传导产生的温差,即认为热电偶在硅背面测量的温度为硅材料的温度。三个热电偶分别测量了样品上不同位置温

度随时间的变化。其在材料表面的布局如图4左图所示。其中1号热电偶位于材料的中心,2号距离材料中心位置10 mm,3号热电偶则在硅材料的边缘,距离材料中心20 mm。实验中到靶激光功率130 W,辐照时间60 s,材料的温度随激光作用时间的变化曲线如图4右图所示。

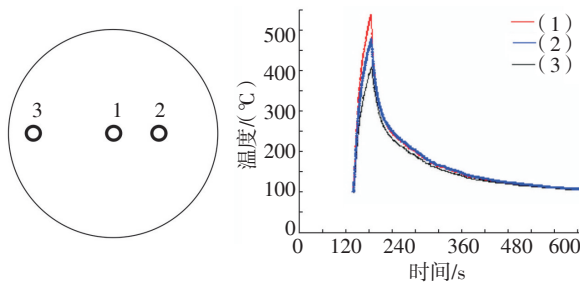


图4 测温点在材料表面的分布及对应测量温度曲线

从温度曲线上看,硅材料表面的温度由中心向四周逐渐降低;激光辐照区域内温度上升得最快,随着距中心距离的增大,温度上升变得缓慢,变化趋势也变得平缓。同时利用红外热像仪对材料表面的温度分布进行了监测。监测结果发现,材料中心的灰度值最大,从中心向边缘处延伸,亮度逐渐变弱,表明中心处的温度最高,向边缘延伸时温度逐渐降低,这与用热电偶测量出来的结果基本一致。

3 数值分析与模拟

为了对激光辐照硅材料时硅的温度升高与分布情况进行进一步研究,根据实验情况与条件进行了数值模拟与分析。

在激光辐照硅材料过程中,激光能量被分为两部分,一部分被材料的表层吸收,另一部分被反射。被吸收的激光能量转化为热能并通过热传导作用在材料内部扩散,从而形成温度场使材料温度升高。材料吸收的光能在作用的瞬间转变成热能,并且迅速建立局部的热动态平衡。假设材料的热边界为绝热状态,光束半径为 a 的激光光斑照射在半径为 b 的圆形靶材上,由于圆形靶材样品为轴对称,可以将热传导方程简化为二维方程^[3,4,8],则有热传导方程如下

$$\rho c \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[k_r \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{k_r}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v \quad (1)$$

$$q_v = (1 - R)\eta I(r)$$

其中, ρ 为硅密度的密度; c 为材料的比热容; k 为材料的热传导率; q_v 为激光热源; $I(r)$ 为作用于材料表面的激光功率密度; R 为材料的反射率; η 为材料表面对激光的吸收系数。

在光斑半径内光强分布均匀的情况下,除激光辐照面外,其他各边界与外界绝热,满足第一类边界条件

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0 \quad (2)$$

初始条件为

$$T \Big|_{t=0} = 300 \quad (3)$$

温度单位为K。

由于激光为高斯光束,激光功率密度有如下公式

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2/a^2) \quad (4)$$

其中, I_0 为激光功率密度的最大值。利用Hankel积分变换的方法,对二维导热方程进行解析求解,即可以得到其解析解。

为了根据全面的分析实验数据,开展了激光辐照光学材料温度分布的建模仿真计算,选择的材料和激光参数与实验中一致,硅材料规格: $\phi 50 \times 4$ mm,激光功率90 W,光斑大小5 mm,仿真计算结果如图5所示。

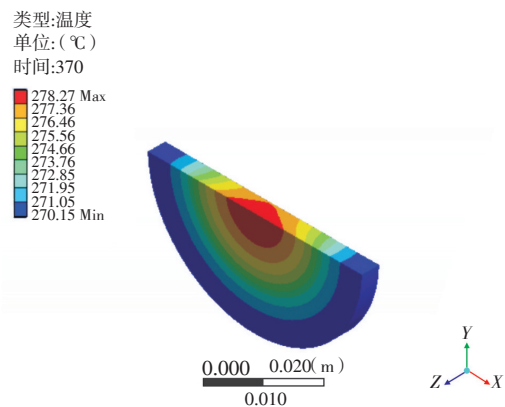


图5 辐照停止时硅材料表面温度分布

为了检验仿真模型与实际情况符合程度,将仿真时材料中心温度变化曲线结果与相同条件下实验测试的结果进行了对比,如图6所示。

对比结果显示,理论模型仿真数据与实验数据基本吻合。表明模型建立基本符合实际情况。在进行激光加工时,可根据加工实际参数改变模型中激光功率、激光辐照面积、激光辐照时间等参数,进

(下转第38页)

参考文献

- [1] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译.3版.北京:电子工业出版社,2013:443-467.
- [2] 费叶泰. 误差理论与数据处理[M]. 6版.北京:机械工业出版社,2010:46-47.
- [3] Bradley M Ratliff, Majeed M Hayat, J Scott Tyo. Generalized algebraic scene-based nonuniformity[J]. Optical Society of America,2005, 22(2): 239-249.
- [4] 孙红胜,陈应航,隋左宁. 红外成像导引头灵敏度现场校准技术研究[J]. 红外与激光工程,2008,37 :463-469.
- [5] 张学峰,陈宝国,樊养余. 基于场景的红外非均匀性校正算法对比研究[J]. 红外技术,2013,35(9):560-566.
- [6] 任婷婷,张智杰. 一种基于场景的红外图像非均匀性校

- 正算法[J]. 光学与光电技术,2014.12(9):44-47.
- [7] 陈锐,谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术,2002,24(1):1-3.
- [8] 左超,陈钱. 基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正[J]. 光子学报,2011,40(6):926-932.
- [9] 李玉珏. 基于两点法的使用FPA非均匀性校正系统[J]. 激光与红外,2007,37(8):753-755.
- [10] 陈治宣,周晓东,姜树理. 红外焦平面阵列非均匀性校正研究[J]. 海军航空工程学院学报,2006,21(4):444-448.
- [11] CHEN Bao-guo, FAN Yang-yu, ZHANG Xue-feng, et al. Moving scene based nonuniformity correction algorithm[C]// Proceeding of SPIE,2012,8419: 84191Q-1-84191Q-6.
- [12] 刘书琴,毋立芳,宫玉. 图像质量评价综述[J]. 中国科技论文在线,2011,6(7):501-523.

(上接第10页)

行硅材料表面的温度分布分析。

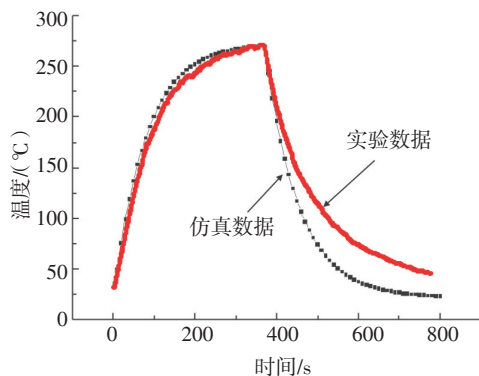


图6 理论计算与实验数据结果对比

4 结 论

使用不同功率的连续激光辐照硅材料,测量了硅材料不同位置的温度变化曲线,并根据实验条件进行了数值建模,得到了连续激光辐照硅材料表面的温度分布模型,并利用该模型进行仿真模拟,得到的模拟结果与实验结果基本一致。说明模型建立符合实际情况。可通过改变该模型参数进行激光加工模拟实验,为激光加工硅材料的热效应分析提供了实验依据。

参考文献

- [1] 强希文,张建泉,刘峰,等. 强激光辐照半导体材料的温升及热应力损伤的理论研究[J]. 中国激光,2000,27(8):709-713.
- [2] 段晓峰,汪岳峰,牛燕雄,等. 激光辐照光学材料热力效应的解析计算和损伤评估[J]. 中国激光,2004,31(12):1455-1459.
- [3] 沈中华,陆建,倪建武. 强激光作用下半导体材料的加热与熔融的解析计算[J]. 中国激光,1998,25(7):632-636.
- [4] 沈中华,陆建. 硅材料在强激光作用下的二维温升模拟计算[J]. 南京理工大学学报,1998,22(3):272-275.
- [5] ZHANG Chen-zhi, Blarrie L. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. Applied Optics, 1993, 32(27): 632-636.
- [6] Appleton B R. Laser and electron beam interactions with solids[J]. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 1982: 3-11.
- [7] 孙承纬,陆启生,范正修,等. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002:28-42.
- [8] 彭玉峰,盛朝霞,张虎,等. 激光辐照下固体材料的温度分布理论研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(10):1225-1227.
- [9] 禹焯,牛燕雄,刘杰. 强激光辐照下硅材料的温度分布研究[J]. 科学技术与工程,2006,6(19):3185-3187.