

文章编号:1001-5078(2011)07-0766-04

· 激光应用技术 ·

# 有限元仿真激光焊接亚微米尺度一维氧化锌

焦 扬, 李 静, 黄文浩, 张恭轩

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:**采用 ANSYS 有限元软件仿真激光对接焊直径从 200 ~ 1000 nm、长 5  $\mu\text{m}$  的一维氧化锌材料,得到了温度和熔池分布。针对 500 nm 的一维氧化锌材料,若在焊缝处形成不同深度的熔池,焊接时间每降一倍,激光功率需提高 0.5 倍。以熔池达到接合处截面面积的 50% 为仿真目标,对不同直径的一维氧化锌材料和聚焦光斑离焦量进行了仿真,随着材料直径的增大,焊接时间近似呈指数增大,而激光功率近似呈指数衰减;无论正负离焦,随着离焦量的增大,所需激光功率在氧化锌直径减小时急剧增加;当负离焦时,随着离焦量的增大,所需激光焊接时间在氧化锌直径增大时显著降低,但正离焦时,变化不显著。

**关键词:**激光焊接;温度场;ANSYS;微尺度一维氧化锌

**中图分类号:**TN249   **文献标识码:**A   **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.012

## Finite element simulation of laser welding one dimensional sub-micrometer ZnO

JIAO Yang, LI Jing, HUANG Wen-hao, ZHAMNG Gong-xuan

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Finite element software ANSYS is used to simulate laser straight welding one dimensional ZnO with diameter from 200 nm to 1000 nm and 5  $\mu\text{m}$  length, the distribution of temperature and melting pool is obtained. For one dimensional ZnO with 500 nm diameter, the laser power should be increased by 0.5 time as welding time was reduced to half in order to form different depth of melting pool at the joint. The situation in which diameters of one dimensional ZnO and defocus distance of the focus points are different is simulated to form the 50% interface area of the melting pool. The needed power exponentially decays and the needed welding time exponentially grows as the material's diameter increases. No matter positive or negative defocus, with the increase of the defocus distance the needed laser power increases evidently as the diameter of ZnO decreases. In the case of negative defocus, with the increase of the focus distance, the needed laser welding time falls remarkably as the diameter of ZnO increases, however, in the case of positive defocus, the needed welding time almost unchanged.

**Key words:** laser welding; distribution of temperature; ANSYS; one dimensional sub-micrometer ZnO

### 1 引言

在微器件的加工与制作过程中如何在各元器件之间形成良好可靠的连接是一个重要的环节。微尺度材料的连接方式有离子束沉积,高能电子束轰击,超声波辐射,激光加热,电流生热等<sup>[1-5]</sup>。

氧化锌是一种重要的直接宽禁带半导体,主要

应用于声表面波器件、气敏器件、太阳能电池、液晶显示、压敏器件等方面,纳米氧化锌在场效应晶体管、单电子晶体管、低压和短波长光电子器件等方面

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 50975271)资助。

**作者简介:**焦 扬(1986-),男,硕士研究生,主要从事有限元热仿真,纳米技术方面的研究。E-mail: jiaoyang\_2@163.com

**收稿日期:**2011-03-04

具有潜在的应用前景<sup>[6-7]</sup>。因此,采用激光加热微尺度氧化锌材料,使其融合后形成新的构件,对于微器件的制作具有实际意义。本文采用 ANSYS 有限元软件仿真激光融合直径在 200 ~ 1000 nm、长度 5 μm 的微尺度一维氧化锌材料,通过对达到不同熔池截面面积、对不同直径的氧化锌材料焊接和不同聚焦光斑离焦量的仿真,获取实现焊接所需的条件。

### 2 焊接模型与热源模型

固体材料的导热形式可分为声子导热、电子导热和光子导热。由于氧化锌是半导体晶体,其主要的导热形式为声子导热。Flik 等在 1992 年提出,对于平均自由程对热量载体起决定作用的情况,若某个方向的特征尺寸比该方向的平均自由程小时,则认为该方向中的热传导存在微尺寸效应<sup>[8]</sup>。对晶体而言,常温下,其平均自由程在几十纳米这个量级,并且其随着温度的升高急剧衰减<sup>[9]</sup>。本文仿真所采用的一维氧化锌晶体的特征尺寸即直径在亚微米量级,远大于其平均自由程,所以可以根据弛豫时间近似的连续方程和能量守恒方程结合在一起描述能量转换过程,通过把傅里叶定律和热力学第一定律结合起来,推导出求解温度分布的热传导方程。因此可以采用 ANSYS 有限元软件仿真。

仿真的氧化锌为钐矿结构,正六棱柱体。焊接形式采用对接焊,如图 1 所示。坐标原点设在焊缝处,氧化锌表面。



图 1 对接焊模型

Fig. 1 straight welding model

高斯激光经过准直后,被高数值孔径 NA = 1.3 的物镜聚焦,得到的聚焦光斑接近衍射极限,因此将聚焦点即激光束腰半径取为波长一半。入射的体热源热流密度表示为:

$$Q = \frac{P\beta a}{\pi w_z^2} \exp\left[-\frac{4(x^2 + y^2)}{w_z^2}\right] \exp(-az) \quad (1)$$

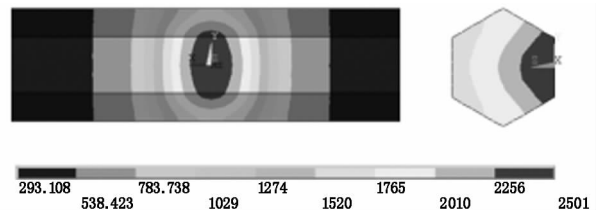
其中:

$$w_z = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{z_R}\right)^2} \quad z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

其中, $P$  为激光功率; $\beta$  为扣除反射后的激光效率,取 0.89, $w_0$  为束腰直径; $w_z$  为任意  $z$  处束腰; $z_0$  为聚焦点在  $z$  向的位置坐标; $\lambda$  为光源波长,取 532 nm, $a$  为吸收系数,取  $1.6 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ 。由于光学系统的效率受光学系统结构的影响,所以不计光学系统效率,仿真结果中的激光功率均为最后入射到材料上的功率。

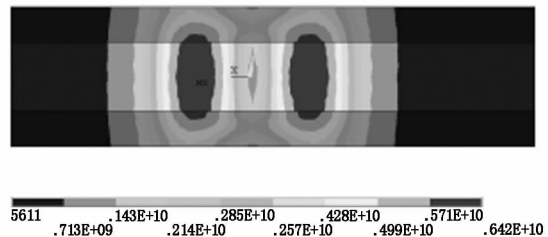
### 3 有限元仿真结果

氧化锌材料的熔点 2248 K,沸点 2633 K,仿真中以大于等于熔点、小于沸点的温度分布区域作为形成的熔池,通过选择合适的激光工作参数避免气化产生。图 2(a) 是焊接时间为 50 ns,激光功率为 33.01 mW,对直径 500 nm 的氧化锌焊接时,得到焊缝及其附近的温度分布图。由右边的焊缝处截面图可见,熔池占到截面的 1/5。图 2(b) 为该状态下的温度梯度图,中心部位温度梯度小,焊缝两边对称位置处温度梯度最大,这与光强呈高斯分布的光束最大值处即中心处斜率为零,中心两边光强梯度最大相吻合。其他条件不变,激光功率 4.75 mW,作用时间 1600 ns 的温度场分布如图 3 所示,左边为正视图,右面为熔池截面图,可见完整的熔池已经在界面形成,再增加焊接时间,熔池将会进一步往氧化锌材料两边扩展并会发生气化现象。



(a) 温度和熔池分布图

(a) temperature and melting pool distribution



(b) 温度梯度图

(b) temperature grads distribution

图 2 激光功率 33.01 mW,作用时间 50 ns,焊接直径 500 nm 的一维氧化锌

Fig. 2 laser with power 33.01 mW and working time 50 ns welding one dimensional ZnO of 500 nm diameter

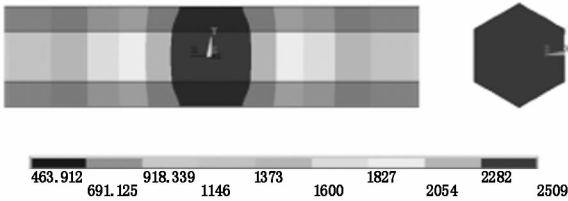


图 3 激光功率 4.75 mW,作用时间 1600 ns,焊接直径 500 nm 的一维氧化锌,得到的温度和熔池分布图

Fig.3 temperature and melting pool distribution as laser with 4.75 mW power and working time 1600 ns welding one dimensional ZnO of diameter 500 nm

以直径 500 nm 的氧化锌材料为焊接对象,仿真氧化锌焊缝处熔池深度逐渐增加时对应所需的激光功率和焊接时间。图 4 显示焊接时间从 25 ~ 1600 ns 时所需的功率。可见,时间每降低一倍,功率需提高 0.5 倍左右。

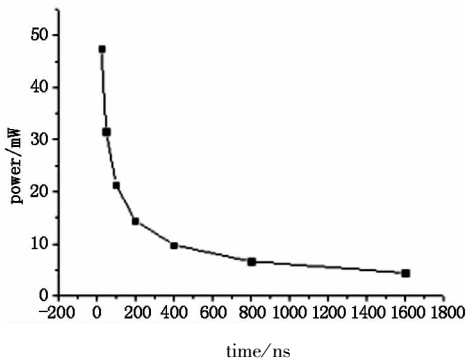
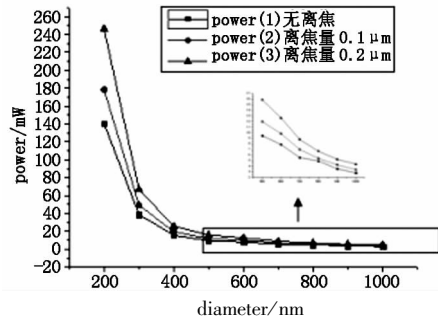


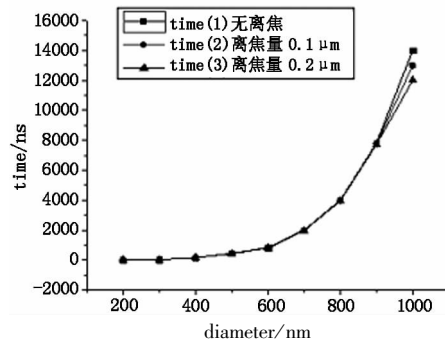
图 4 焊接直径 500 nm 一维氧化锌,不同焊接时间所需激光功率

Fig.4 the needed Laser power changing with working time as welding one dimensional ZnO of 500 nm diameter

为方便对不同直径氧化锌焊接的仿真结果进行比较,以焊缝处熔池达到截面面积的 50% 作为仿真目标,对直径从 200 ~ 1000 nm 的氧化锌材料,在对焊时所需激光功率与焊接时间及聚焦点位置对焊接的影响进行了仿真。图 5 中曲线 1、2、3 分别为无离焦、正离焦 0.1 μm、正离焦 0.2 μm 的情况。图 5(a) 为所需激光功率,图中插图为对应数据点局部放大图。可见随着直径增大,所需激光功率近似呈指数衰减;离焦量增大时所需激光功率在氧化锌直径减小时急剧增大。图 5(b) 为所需焊接时间,可见随着直径增大,所需焊接时间近似呈指数增加,离焦量对焊接时间的影响只在直径较大时较为显著。



(a) 所需激光功率  
(a) the needed laser power

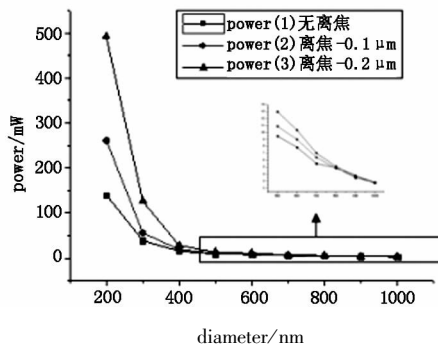


(b) 所需焊接时间  
(b) the needed welding time

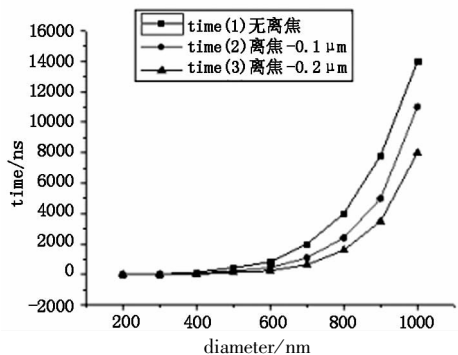
图 5 对不同直径一维氧化锌在正离焦量不同时进行焊接,实现 50% 熔池深度所需激光功率和焊接时间

Fig.5 the needed laser power and welding time for the 50% melting pool depth as diameter of one dimensional ZnO and positive defocus changing

图 6 中曲线分别为无离焦、负离焦 0.1 μm、负离焦 0.2 μm 的情况。图 6(a) 为所需激光功率,图中插图为对应点的局部放大图。可见,随直径增大,所需激光功率近似呈指数衰减趋势;离焦量增大时,在氧化锌直径减小时,所需要激光功率急剧增大。图 6(b) 为焊接所需时间,随着直径增大,焊接时间近似呈指数增加。离焦量增大时,所需焊接时间在氧化锌直径增加时显著降低。



(a) 所需激光功率  
(a) the needed laser power



(b) 所需焊接时间

(b) the needed welding time

图6 对不同直径一维氧化锌在负离焦量不同时进行焊接, 实现50%熔池深度所需激光功率和焊接时间

Fig. 6 the needed laser power and welding time for the 50% melting pool depth as diameter of one dimensional ZnO and negative defocus changing

#### 4 结 论

运用 ANSYS 软件建立了激光焊接亚微米尺度一维氧化锌材料的仿真模型。以直径 500 nm 的一维氧化锌材料为仿真焊接对象, 得到了激光作用时间下的温度、熔池分布和温度梯度分布图。针对 500 nm 的一维氧化锌材料, 若在焊缝处形成不同熔池深度, 焊接时间每降一倍, 激光光源功率需提高 0.5 倍。以熔池深度达到截面面积的 50% 为仿真目标, 对不同直径的一维氧化锌材料和聚焦光斑离焦量进行了仿真, 得到所需的焊接时间与对应的激光功率。随着材料直径的增大, 焊接时间近似呈指数增大, 而激光功率近似呈指数衰减; 无论正负离焦, 随着离焦量的增大, 所需激光功率在氧化锌直径减小时急剧增加; 当负离焦时, 随着离焦量的增大, 所需激光焊接时间在氧化锌直径增大时显著降低, 但正离焦时, 变化不显著。仿真结果对于实验研究具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] Changxin Chen, Lijun Yan. Ultrasonic nanowelding of carbon nanotubes to metal electrodes [J]. Nanotechnology, 2006, 17: 2192 - 2197.
- [2] Changxin Chen, Dong Xu. Multichannel carbon-nanotube FETs and complementary logic gates with nanowelded contacts [J]. IEEE Electron Device Letter, 2006, 27 (10): 852 - 855.
- [3] J C She, S An. Laser welding of a single tungsten oxide nanotip on a handleable tungsten wire: A demonstration of laser-weld nanoassembly [J]. APL, 2007, 90: 073103.
- [4] Hironori. Welding of pt nanowires by joule heating [J]. Scripta Materialia, 2007, 57: 953 - 956.
- [5] Gen Ping, Yang Yuling. Lower power Nd:YAG laser welding of 18 - 8 austenitic stainless steel [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 34 - 36. (in Chinese)  
耿平, 杨玉玲. 18 - 8 型奥氏体不锈钢低功率 Nd:YAG 激光焊接研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(1): 34 - 36.
- [6] Li Y, Meng G W, Zhang L D, et al. Ordered semiconductor ZnO nanowire arrays and their photoluminescence properties [J]. Applied Physics Letter, 2000, 76: 2011 - 2013.
- [7] Johnson J, Yan H, Yang P, et al. Opticalcavity effects in ZnO nanowire lasers and wave guides [J]. Physics Chemical B, 2003: 8816 - 8828.
- [8] Flik M. Heat transfer regimes in microstructures [J]. ASME J. of Heat Transfer, 1992, 114: 666 - 674.
- [9] Liu Chengcheng, Cao Quanxi. First-principles study of the thermal transport property of  $Y_3Al_5O_{12}$  [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2697 - 2702. (in Chinese)  
刘铖铖, 曹全喜.  $Y_3Al_5O_{12}$  的热输运性质的第一性原理研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2697 - 2702.