

Si/Glass 激光键合的仿真及实验研究

张志强^{1,2} 徐静¹ 李绍良^{1,2} 吴亚明¹

(¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所微系统技术重点实验室, 上海 200050)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对 Si/Glass 激光键合进行了有限元仿真, 自主设计激光键合系统并进行了 Si/Glass 激光键合实验研究、测试与表征。以 Si/Glass 激光键合的二维传热解析模型为理论基础, 应用有限元软件 ANSYS 仿真了激光功率 20~48 W 时激光键合的三维温度场、键合熔融深度, 并预测键合阈值功率为 28 W。自主设计激光键合系统及实验方案, 采用光斑直径 150 μm 、功率 30 W 的 Nd:YAG 连续激光实现了 Si/Glass 的良好激光键合。测试结果表明, 激光键合强度最高为阳极键合的 5.2 倍, 激光键合腔体气密性测试泄漏率平均值约 $9.29 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 与阳极键合处于同一数量级。采用能谱分析(EDS)线扫描 Si/Glass 激光键合的界面材料成分, 发现键合界面形成过渡层, 激光功率 30 W 时过渡层厚度 9 μm , 与仿真结果吻合。

关键词 光学制造; 激光键合; 有限元方法; 键合强度; 气密性; 能谱分析线扫描

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0703006

Numerical and Experimental Investigation of Laser Bonding Silicon and Glass

Zhang Zhiqiang^{1,2} Xu Jing¹ Li Shaoliang^{1,2} Wu Yaming¹

(¹ *Science and Technology on Micro-System Laboratory, Shanghai Institute of Micro-System and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*
² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract This paper investigates laser bonding of silicon and Pyrex7740 glass by finite element method (FEM) simulation, self-design of apparatus and experimental research, test and characterization of bonding results. Based on a theoretical heat transfer two-dimensional (2D) model, a three-dimensional (3D) numerical simulation of laser bonding silicon and glass with laser power 20~48 W is conducted using ANSYS FEM software. Simulation results include temperature field and melted bonding depth which predicts the bonding threshold power is 28 W. A laser bonding apparatus with laser spot diameter of 150 μm and laser power of 30 W is designed to achieve good bonding. Shear force test shows that the bonding strength is 5.2 times of that of anodic bonding, while helium leak test on hermeticity of bonding samples observes average leakage rate of about $9.29 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, which is the same order of magnitude as anodic bonding. From energy dispersive spectroscopy (EDS) line scanning laser bonded Si/glass interface cross section, the thickness of transition layer is 9 μm under 30 W laser, which agrees with the simulation results.

Key words optical fabrication; laser bonding; finite element method; bonding strength; hermeticity; energy dispersive spectroscopy line scan

OCIS codes 140.3390; 140.3500; 140.6810

1 引言

键合技术是将硅片与硅片、硅片与玻璃或其他

材料通过化学和物理作用紧密地结合起来, 是一种微机电系统 (MEMS) 体加工关键工艺。硅片键合

收稿日期: 2012-02-15; **收到修改稿日期**: 2012-03-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目资助课题。

作者简介: 张志强(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光键合技术方面的研究。E-mail: zqzhang@mail.sim.ac.cn

导师简介: 吴亚明(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学 MEMS 技术、光通信器件、光电传感、集成光学等方面的研究。E-mail: yamingwu@mail.sim.ac.cn(通信联系人)

技术与其他工艺手段结合,可以制造复杂的微结构,还可实现机械结构之间或机械结构与电路之间的电学连接。键合也是 MEMS 封装的重要工艺,对微结构提供支撑和保护。对于 MEMS 领域大多数产品,封装占整个 MEMS 器件 50%~70% 的成本^[1], MEMS 器件的商业化需要解决器件封装的高成本问题。在 MEMS 技术中,目前主要的键合技术包括阳极键合、硅熔融键合、共晶键合、焊料键合等技术。这些键合技术需要全局高温或/和高压电场、严格的基片清洗步骤、对基片施加一定的压力,同时对键合表面光洁度要求高,且对键合材料有选择性^[2]。

为了防止高温、高电压损坏温度敏感和电压敏感的器件或材料,应用局部加热的键合技术将高温限定在指定的区域内而其余部分保持低温是一个可行解决方案,对 MEMS 器件的制造和封装具有重要意义。Cheng 等^[3]应用局部电阻丝加热的方法成功进行了局部键合,但不是所有的 MEMS 器件中都适合加入电阻丝(如大多数光学 MEMS 器件),且电阻丝加热局部键合工艺较复杂。理想的局部键合技术应该是局部高温,且其加热区域可以灵活控制,激光键合^[4~10]正是这样一种键合技术。激光键合也称为激光辅助局部键合,具有非接触加热、加热区域位置和大小可灵活控制、键合材料广、操作快速等一系列优点^[11]。激光键合按使用激光器种类可分为 CO₂ 激光键合、半导体激光键合和 Nd:YAG 激光键合等,其中 Nd:YAG 激光键合研究工作较多。Nd:YAG 激光键合的激光波长有三倍频 355 nm、倍频 532 nm 及基频 1064 nm 等几种。键合激光波长越短光子能量越大,材料光吸收系数越大,光斑可聚焦得越小,同时成本也较高。按激光工作模式,可分为连续激光键合和脉冲激光键合,脉冲激光可以获得短时间内的低功率密度,但键合质量不如连续激光平顺。按键合有无中间层,可分为直接键合(无中间层)和夹层键合,夹层键合通过添加合金层等夹层材料获得更低的键合温度。激光键合还需要控制激光功率、行走速率、激光光斑、外加压力等参数。国际上激光键合已开展了广泛的研究,而国内在激光键合领域的研究则较少^[12]。

本文自主设计并实现了连续 Nd:YAG 激光键合设备,并开展了 Si 和 Pyrex 7740 玻璃(简称 Pyrex 玻璃)的激光键合工艺研究,成功实现了 Si/Glass 激光键合,并对键合样品进行了测试和表征。Si 和 Pyrex 玻璃都是 MEMS 领域中最常用的材料,两种材料的有效局部键合对 MEMS 器件制作及

封装具有非常重要的意义。还采用有限元方法(FEM)仿真研究了激光功率密度、行走速度等参数对键合的影响,对获得优化激光键合工艺参数具有指导意义,同时对激光键合物理化学过程的理解很有价值。

2 激光键合原理及有限元数值模拟

2.1 Si/Glass 激光键合原理

Si/Glass 激光键合也称为激光穿透键合,其原理是 Pyrex 玻璃对激光波长透明,而 Si 材料吸收激光,激光透过 Pyrex 玻璃照射到 Pyrex 玻璃与 Si 材料界面上,界面处的 Si 材料吸收激光能量发生共晶或熔融键合^[9],如图 1 所示。Pyrex 玻璃对 1064 nm 波长的激光透射率超过 90%,而 Si 的吸收率超过 40%^[9],与 Si 基片的厚度有关。

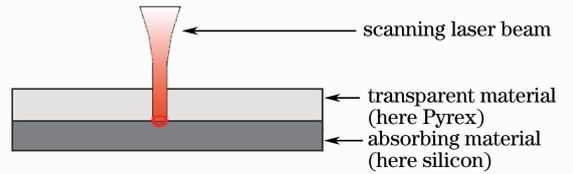


图 1 Si/Glass 激光键合原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Si/glass laser bonding principle

2.2 激光键合的二维传热模型

入射激光功率密度分布为高斯分布^[4,13]:

$$I(r) = (1 - R) \frac{2P}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right), \quad (1)$$

式中 R 为反射率, P 为激光输出功率, ω 为入射激光光斑半径, r 为横向柱坐标, $r = 0$ 处为光斑中心。

$$I_0 = \frac{2P}{\pi\omega^2}, \quad (2)$$

(2)式为圆形光斑中心的最大能流密度。在激光作用期间 Si/Glass 接触面的边界条件是一致的,即 $T_{\text{glass}} = T_{\text{silicon}}$ 。在 $t = 0$ 时刻,整个键合材料的温度等于室温,即 $T(r, z, t = 0) = 300 \text{ K}$ 。

由于激光光斑是轴对称的高斯分布,所以在光斑中心 $r = 0$ 处是绝热边界: $\partial T / \partial r = 0$ 。与激光提供的热量相比,玻璃上表面和硅片下表面处由辐射对流和热传导引起的热损耗很小,可以忽略不计。无限远处恒等于室温: $T(r \rightarrow \infty, z, t) = 300 \text{ K}$,近似计算中定义硅层下表面远离激光作用区域的边线节点为恒定室温边界。

由于 Pyrex 玻璃对 Nd:YAG 激光是透明的,所以玻璃中的激光吸收可以忽略不计,激光能量近似完全由 Si 层吸收,Si 吸收能量后温度上升再通过热

传导的方式使 Pyrex 玻璃温度上升。激光照射时玻璃层的柱坐标热传控制方程为^[7]

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad (3)$$

Si 层的柱坐标热传控制方程为

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_{ab}(r, t), \quad (4)$$

式中 Q_{ab} 为 Si 层吸收的热量。

2.3 宽温区材料特性

在 Si/Glass 激光键合的有限元分析中, Si 材料吸热熔融后固化, Si 材料在键合过程中要发生相变。相变分析需要考虑相变过程中吸收或释放的潜热, 通过定义材料随温度变化的焓值 H 来考虑潜热, 焓值的变化 $\Delta H = \int \alpha(T) dT$ 可根据密度和比热推算。忽略辐射及对流换热^[11], 需要知道 Si 和 Pyrex 材料的密度、比热容和热传导系数在宽温区内随温度变化的值。Si 的熔点约为 1410 °C, 根据 Matweb 网站 (<http://www.matweb.com>) 和 Okhotin 等^[14~16] 的报道数据, 固体 Si 的密度约为 2330.0 kg/m³, 熔融 Si 的密度约为 2530.0 kg/m³, Si 的比热容和热传导系数通过拟合报道数据得到, 图 2 所示为 Si 在 0 °C ~ 1800 °C 范围内的材料热学特性参数。Pyrex 玻璃密度 2227.0 kg/m³, 热膨胀系数与 Si 接近。非晶体材料随温度变化的热学特性较复杂, 根据美国航空航天局(NASA)^[17,18] 的研究结果进行插值处理得到 Pyrex 在 0 °C ~ 1800 °C 范围内热学特性参数包括比热容、热导率如图 3 所示。

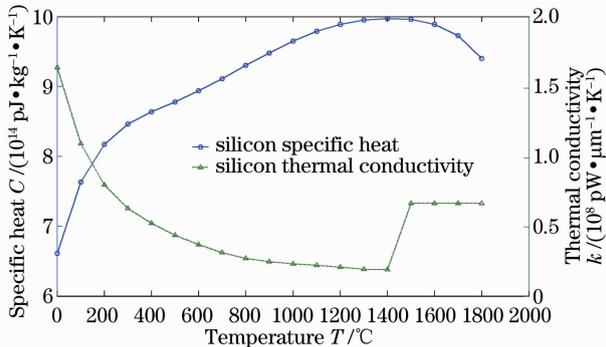


图 2 硅随温度变化的材料热学特性参数

Fig. 2 Thermal properties of silicon at different temperatures

2.4 Si/Glass 激光键合的 ANSYS 有限元模拟

ANSYS 有限元分析是一种有效的数值模拟激光键合的方法^[19~21]。Si/Glass 激光键合仿真的模型如下: Nd:YAG 1064 nm 连续高斯激光以移动圆

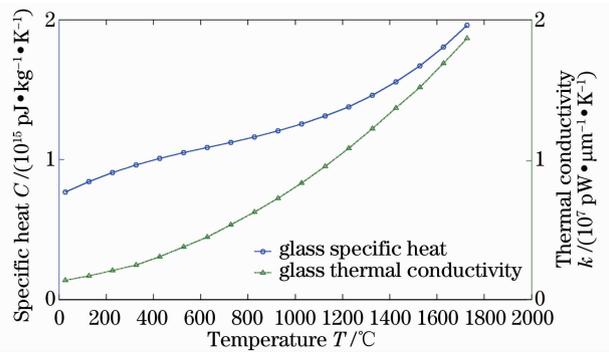


图 3 Pyrex 玻璃随温度变化的材料热学特性参数
Fig. 3 Thermal properties of Pyrex glass at different temperatures

形高斯热流的形式作用在 Si/Glass 界面的 Si 表面上, 可调参数包括激光功率 P (通过改变热流密度)、光斑半径 r 、激光行走速度 v , 初始计算三参数分别取 30 W、150 μm 、8 mm/s。单元类型采用 8 节点六面体热分析单元 Solid70。硅片和玻璃厚度均为 500 μm , 激光加工路径为中线上的 $l=3$ mm。由于热源和器件具有对称性, 为减少计算量采用 1/2 建模, 模型总尺寸 5 mm \times 2.4 mm \times 1 mm。为了仿真激光的加热效应, 以沿加工路径的 n 个连续的圆形光斑热源等效连续激光, 为保证激光光斑连续覆盖加工路径, 要求 $n \times 2r > 3$ mm, 即 $n > 10$ 。 n 取值越大, 越接近于真实的连续激光, 但计算量也越大, 仿真结果发现 n 取 60 是一个较优选择。图 4 所示为 n 分别为 10 和 60 时的激光光斑覆盖图。

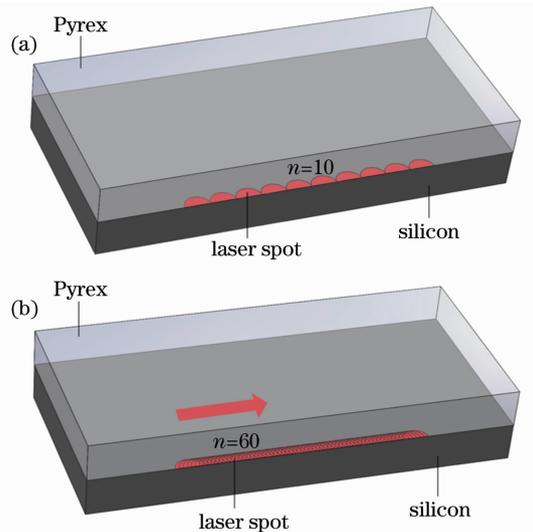


图 4 连续光斑覆盖示意图。(a) $n=10$; (b) $n=60$
Fig. 4 Schematic diagram of continuous spot coverage.

(a) $n=10$; (b) $n=60$

为使计算结果更准确, 需要对激光作用的 Si 区域做网格细化^[22,23], 巧妙地对加工区域单独建模使

整个 Si 层由 5 个六面体组合而成,可采用六面体单元映射划分网格如图 5 所示(彩图请见电子版),红色区域表示激光作用区域,Pyrex 玻璃层与 Si 层对称建模。近似计算中,边界条件定义硅层下表面 4 条边线中远离激光作用区域的 3 条上的所有节点为恒定室温边界。

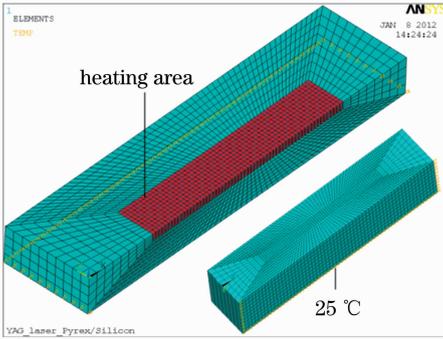


图 5 模型网格划分及施加边界条件

Fig. 5 Model meshing and application of boundary conditions

定义激光光斑移动的循环求解,循环变量即光斑移动步数为 1~60。每步循环开始时先选定 Si 上表面光斑作用区域单元并删除上步所加的热流载荷,以上步的结果温度场作为本步初始温度场,再以移动后坐标为圆心施加高斯光斑热流载荷,离圆心越近单元所受热流密度越大(如图 6 所示),最后做瞬态非线性求解并进入下步循环,直至循环结束求解。激光的每步作用时间为步长 t_{INC} ,相邻两光斑圆心之间距离为 d ,则等效连续激光行走速度为 $v = d/t_{INC}$ 。

通过 ANSYS 后处理器 POST1 可获得随时间变化的温度场分布。将某时刻温度场与 Si 熔点对比,温度超过 1410 °C 的节点认为将发生 Si 的熔融与固化,可得到此时 Si 的熔融深度,也即是键合扩散层的厚度。图 7 为激光功率 30 W,行走速度 8 mm/s,光斑移动至加工路径中点时 Si 层的温度场分布。从图中可以看到激光加工的局部性非常好,高温只局限在很小的范围内。绘制 Si 层上表面沿激光加工路径 L_1 的节点温度分布,以中心节点为对称点温度呈钟形分布,放大激光光斑处可以估算出此时 Si 层熔池直径约为 125 μm ,如图 8(a)所示。绘制温度最高的加工路径中心节点至 Si 层下表面正下方节点之间路径 L_2 的温度分布曲线并放大至 100 μm 范围,如图 8(b)所示,从图中估算出此时 Si 层的熔融深度约为 9 μm ,即仿真的键合扩散层厚度为 9 μm 。

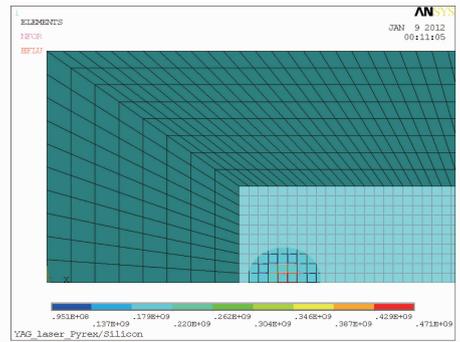


图 6 施加圆形高斯热流载荷示意图

Fig. 6 Application of circular Gaussian heat flux load

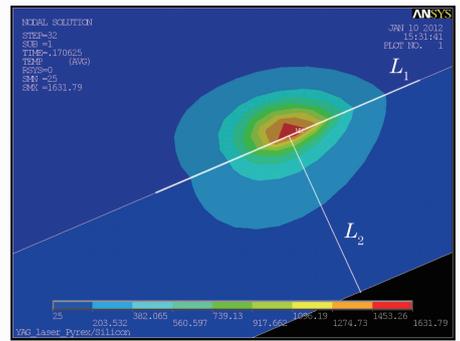


图 7 激光键合后 Si 层的温度场分布

Fig. 7 Temperature field of Si layer after laser bonding

使用不同的激光功率分别仿真求解,得到最高温度与键合扩散层厚度随激光功率变化曲线如图 9 所示,计算的功率变化范围为 20~48 W,算得最高温度变化范围 750 °C~2100 °C,扩散层厚度范围 0~60 μm ,激光功率为 28 W 时键合界面的最高温度开始超过 Si 熔点,键合开始发生。

3 激光键合系统的设计及实现

根据仿真结果并综合考虑现有条件及国内外报道^[4-10,12],实验拟采用功率 30~50 W 可调的 Nd:YAG 连续激光器,光斑直径 150~300 μm ,激光行走速率 0.1~50 mm/s,调节功率、光斑大小和行走速率均可获得不同的激光功率密度。

设计的激光键合实验装置如图 10 所示,为了指示 Nd:YAG 激光的加工位置,安装了红光指示器。激光水冷系统用以维持激光器腔体的正常工作温度为 21 °C。激光束通过扩束镜、反射镜和聚焦透镜组成的光学系统投射在被加工样片上,通过移动激光束来控制键合加工图形。激光束移动控制方法是:Z 轴步进电机控制聚焦透镜沿 Z 方向丝杠上下运动控制激光焦点位置,也即调整离焦量,从而控制键合界面激光光斑的大小;反射镜 III 固定在 Z 向丝杠

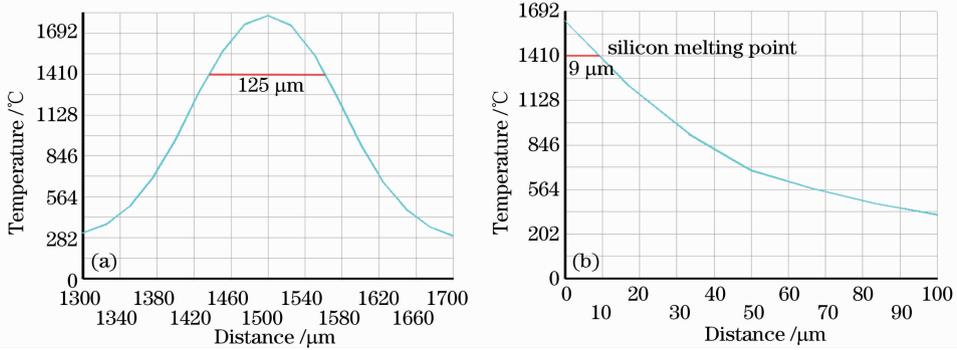


图 8 路径温度分布曲线放大图显示熔融范围及深度。(a)沿激光行走路径 L_1 ; (b)垂直激光路径 L_2

Fig. 8 Enlarged temperature curves indicating melting area and depth. (a) L_1 along laser moving direction; (b) L_2 normal to L_1

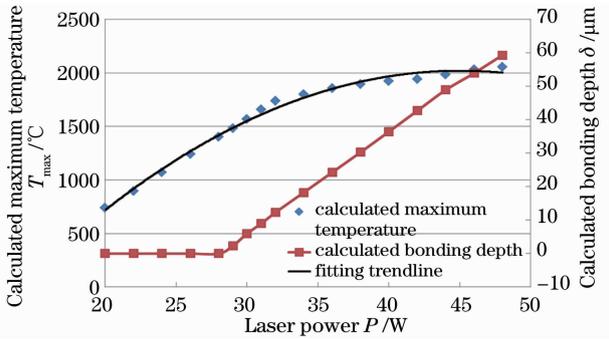


图 9 不同功率下的键合深度及最高温度

Fig. 9 Bonding depth and maximum temperature at different laser powers

顶端与聚焦透镜一起沿 X 方向丝杠左右运动,反射镜 II 固定在 X 向丝杠右端与反射镜 III 及聚焦透镜一起沿 Y 向丝杠前后运动,XYZ 方向 3 个步进电机、激光电源由可编程控制器(PLC)控制,并通过串口与计算机连接,实现计算机编程实时控制。

实现计算机辅助自动加工的流程为:先用 AutoCAD 软件绘制基于版图的激光加工图形的 dxf 工程图,再将 dxf 工程图通过计算机辅助制造(CAM)软件转化为 G 代码上载入 PLC,由 PLC 在线实时控制 XYZ 三维移动台及激光电源完成激光键合的自动加工图形。

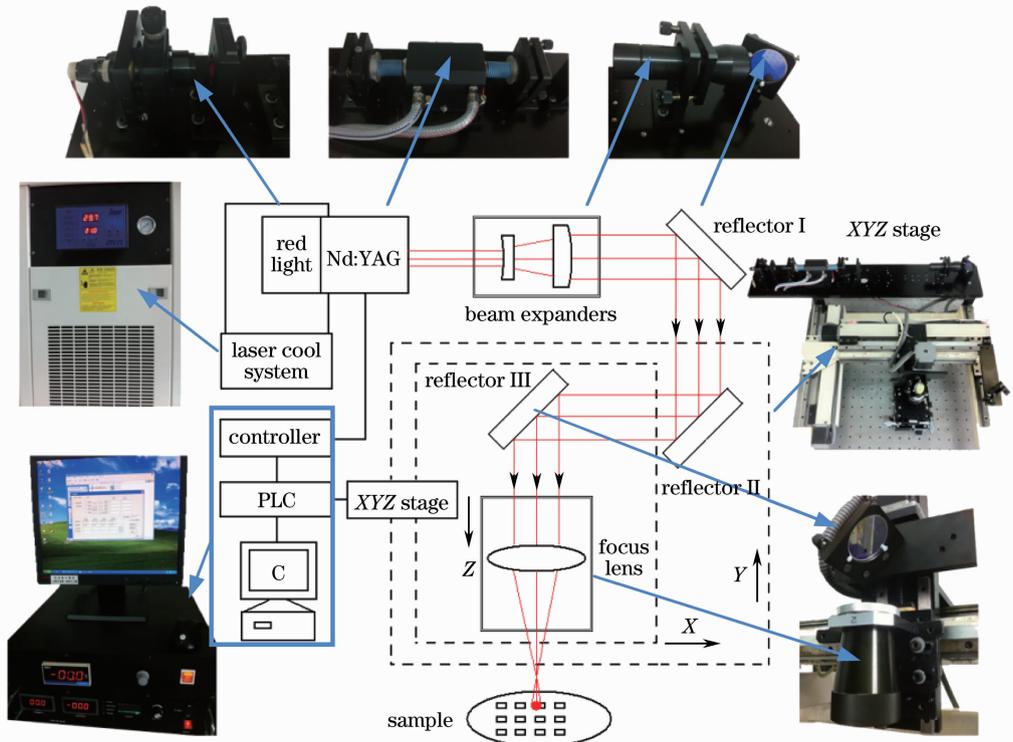


图 10 激光键合实验装置

Fig. 10 Experimental apparatus of laser bonding

4 Si/Glass 激光键合实验研究

4.1 Si/Glass 表面活化接触预键合

影响键合质量的一个重要因素是两键合片接触的紧密程度,键合片接触越紧密,其在键合界面处热传导越充分,键合效果越好。采用对接触表面活化处理进行预键合的方法做激光键合前接触^[24,25],其具有材料选择性广泛、接触实现快速的优点。实验所用 Si 片为 4 inch(101.6 mm)420 μm 厚 p 型 100 晶向,玻璃片是 4 inch(101.6 mm) 500 μm 厚 Pyrex 玻璃。Si 片采用预键合亲水化清洗流程清洗:1) 硅片放入 H₂SO₄ 和 H₂O₂ 体积比 7:1 的混合液中浸泡 20 min,清除表面绝大部分污染物包括金属颗粒及有机物;2) 再放入 RCA1 溶液(NH₄OH、H₂O₂、H₂O 体积比 1:1:7)浸泡 20 min;3) 最后放入 RCA2 溶液(HCl、H₂O₂、H₂O 体积比 1:1:7)20 min。上述每步之后均需去离子水清洗并以 2000 r/min 的速度甩干 3 min。Pyrex 玻璃片则直接采用先 KOH 后 H₂SO₄ 清洗。

表面活化处理之后的 Si 和 Pyrex 玻璃片表面展现亲水特性。RCA1 和 RCA2 溶液清洗使 Si 片表面原本的 Si-O-Si 键破裂形成大量新的 Si-OH 键,而 Pyrex 玻璃表面则由于 Si-O-Si 键破裂形成 Si-H 键。将 Si 片和 Pyrex 玻璃片放入阳极键合机的键合腔中对准,从 Si/Glass 组合片中间向边缘扩散式加压,不施加电场及高温,可以看到 Si/Glass 组合片的接触点迅速结合变黑形成键合波向四周扩散,5 min 之后预键合片完成,如图 11 所示。图中干涉牛顿环是由于键合表面残存微小污染颗粒导致的局部预键合失效。预键合片的键合强

度较弱,容易被分开,需要小心放入片盒备用。在条件有限时,可以在表面活化处理后直接用手完成预键合,而不借助阳极键合机。

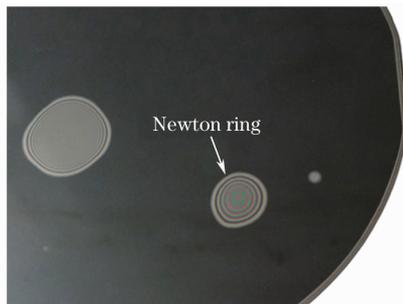


图 11 阳极键合机预键合 Si/Glass 圆片

Fig. 11 Pre-bonded Si/glass by anodic bonding machine

4.2 Si/Glass 激光直接键合

将 Si/Glass 预键合片用 Nd:YAG 激光键合系统进行激光键合,调节键合参数包括激光功率、离焦量及行走速度,通过计算机控制完成激光键合。键合参数会影响键合实验的完成,激光功率太小或离焦量太大都无法形成有效键合,而激光功率太大或离焦量太小将导致键合材料发生爆裂;而激光束行走速度影响激光加热的热流密度,会对激光键合产生影响。在仿真结果的指导下,通过实验发现激光功率 30 W,离焦量 0.32 mm,行走速度 8 mm/s 下键合效果较佳。另一重要参数是键合图案,例如在腔体密封键合中,键合线采用单圈或多圈,如图 12 为一个键合腔体单元的单/多圈键合图案。无论单圈或多圈键合,给定程序自动加工的激光键合速度均很快,实验 4 inch(101.6 mm)硅片上约 90 个单元用 8 圈键合的连续加工时间为 31 min,相比阳极键合的 120 min 大大提高。

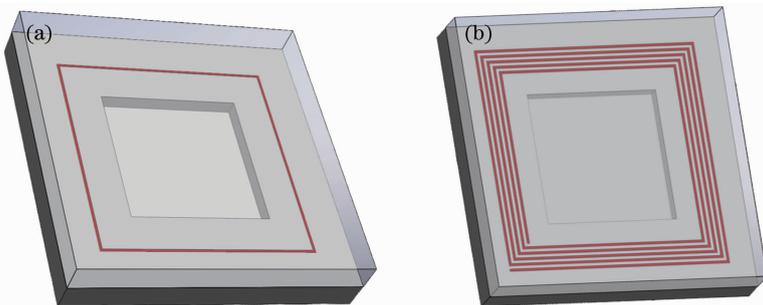


图 12 腔体单/多圈键合图案示意图。(a)单圈;(b)多圈

Fig. 12 Patterns of laser bonding cell. (a) Single loop; (b) multi-loop

图 13 所示为激光键合实验中的样片,图中红光指示点为正在行进中的激光光斑,深色区域为激光加工过后键合良好的区域,浅色区域则是预键合但尚未激光键合的区域。每个单元加工时需选择预键

合良好区域做为激光键合起始点,键合顺序最好整片由内向外逐单元键合,因为上一单元的有效激光键合将使其四周单元发生紧密接触利于键合。反之,随意选择起始点易发生单元虚键的现象,即激光

只作用在硅表面,而玻璃表面实际与硅表面发生分离。单元虚键会使其四周单元都无法成功键合,因为硅表面受激光作用发生热变形,形成的痕迹破坏了原有的 Si/Glass 预键合。图 14(a)所示为单个密封腔体激光键合单元的完整放大图,键合路径为 8 圈,从图中可以看出键合路径平稳清晰,键合路径周围没有发生微裂纹等破坏现象;图 14(b)是键合路径的显微放大图,从形貌看材料已发生先熔融后固化的过程。键合线宽测得约为 $130\ \mu\text{m}$,这与仿真计算结果 $125\ \mu\text{m}$ 吻合。

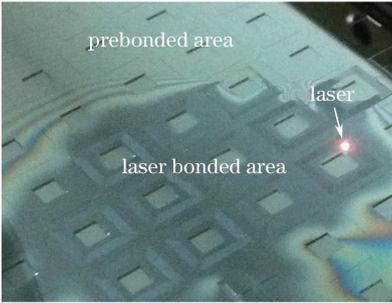


图 13 Si/Glass 激光键合实验过程中照片
Fig. 13 Picture taken in experiment of Si/glass laser bonding

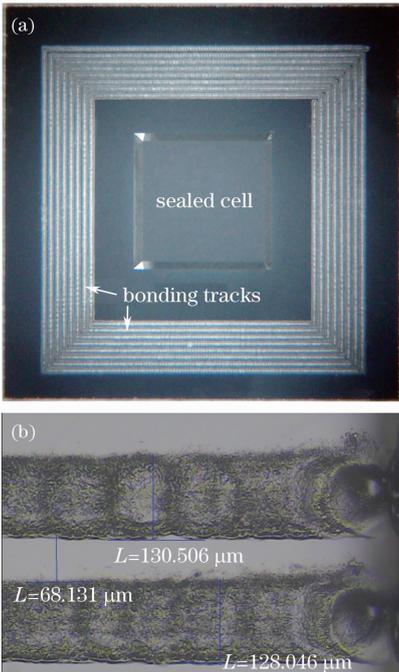


图 14 Si/Glass 激光键合显微放大图。(a)一个完整的键合单元;(b)键合路径

Fig. 14 Micrograph of Si/glass laser bonding.
(a) Bonding cell; (b) bonding tracks

5 激光键合结果测试与表征

考察键合质量的指标主要是键合强度,指通过

剪切力或拉伸测试破坏两种键合材料所需的最大强度,键合强度越大表明越牢固,耐冲击性能越好;在腔体密封键合中,键合的气密性也是键合质量的指标,通常用氟油粗检和氦气精检的方法来测量腔体的泄漏率以考察其气密性能。为了表征激光键合的界面特性,采用材料学中的能谱测量方法如能谱分析(EDS)来表征键合界面的特性,通过检测键合界面的元素分布可对激光键合的物理化学机理进行研究,并验证 Si 熔融深度的仿真结果。

5.1 键合强度

与 MEMS 主流的 Si/Glass 阳极键合技术进行比较,将 Si/Glass 阳极键合、Si/Glass 激光键合、Si/Glass 阳极键合后再激光键合的实验样品分别切片得到单元,用蓝胶粘固在基板上并对单元编号 1~19 做剪切力测试,如图 15 所示。去除测试后发生明显破坏的不可靠结果,统计数据如图 16 所示。

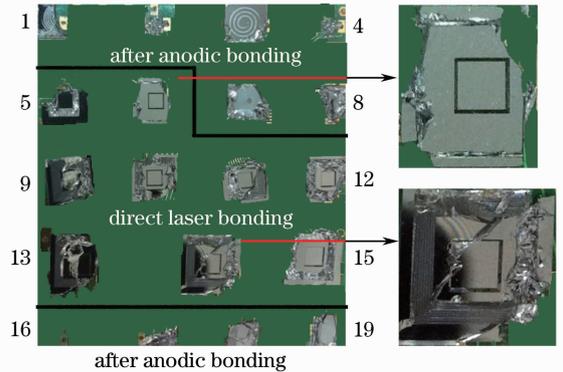


图 15 键合样品剪切力测试后形貌

Fig. 15 Bonding samples after shear force test

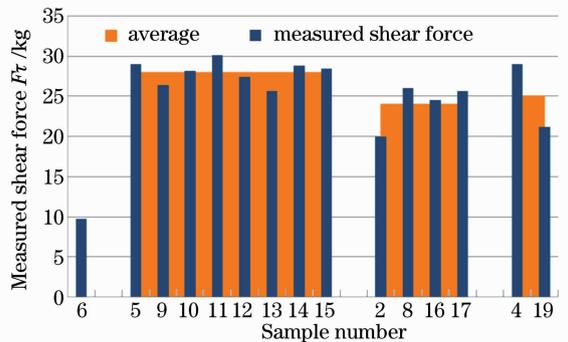


图 16 键合片剪切力测试后键合强度数据统计

Fig. 16 Bonding strength statistics after shear force test on bonding samples

分析图 15 的样品形貌及图 16 的统计数据发现:

1) 6 号单元为单圈直接激光键合样品,剪切力达 $9.7\ \text{kg}$,且剪切力测试后断裂面完整,如图 15 右上所示,说明测试数据可靠,键合面积按 $130\ \mu\text{m}$ 线

宽计算 $4 \times 6 \text{ mm} \times 130 \text{ }\mu\text{m} = 3.12 \text{ mm}^2$, 归一化键合强度 30.5 MPa , 优于现有的激光键合报道强度^[6,9]。

2) 图 16 中第二组 5,9~15 单元为多圈直接激光键合的样片, 其剪切力分布在 $25 \sim 30 \text{ kg}$ 内, 平均 28.0 kg , 键合面积最大的 13~15 号单元其激光键合面积为 27.0 mm^2 , 即归一化键合强度为 10.2 MPa ; 第三组 2,8,16,17 单元为阳极键合后用不同图案激光键合的样片, 平均剪切力 24.0 kg , 而第四组 4,19 号样片为阳极键合片, 平均剪切力 25.1 kg , 阳极键合面积 $7 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 归一化键合强度 5.9 MPa 。按照归一化强度考察, 单圈激光直接键合强度相比阳极键合高 417% , 多圈激光直接键合强度相比阳极键合高 73% , 激光键合强度大大高于阳极键合。

3) 图 15 中 6、14 号单元放大图可见剪切后断裂界面完整, 显微镜对焦观察其材料断裂处与硅平面不在同一焦平面, 即断裂发生在 Si 或玻璃材料内, 说明激光直接键合实现了良好的材料连接。

5.2 键合腔体样品气密性

激光键合的密封腔体样片切片后做氟油粗检和氦气细检检测激光键合的气密性。由于键合腔体大小不同, 且键合图案中有不同加工圈数、不同间隔导致不同的键合面积, 测得的单元泄漏率必然不同。对气密性测量进行的研究发现, 氦气检漏测得的泄漏率数据在其他条件相同时近似与腔体体积成正比, 因此定义泄漏率除以体积的比值作为归一化漏率。将归一化漏率相对键合面积作图如图 17 所示, 算得归一化漏率平均值为 $9.29 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 并指数拟合得到归一化漏率随面积单调递减的趋势线。

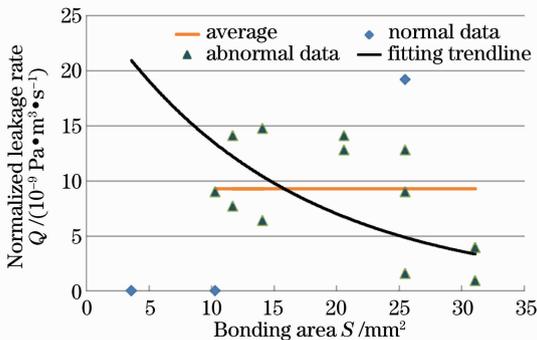


图 17 激光直接键合样品氦气检漏漏率结果统计
Fig. 17 Hermeticity statistics after helium leak test on bonding samples

从图 17 的统计结果可以得出以下结论:

1) 预键合后激光直接键合样片归一化漏率平

均值为 $9.29 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 而之前的研究^[26]获得的阳极键合这一数据约为 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 处于同一数量级, 表明激光键合腔体气密性能良好。

2) 图中的趋势线显示激光键合的归一化漏率随键合面积的增大即圈数的增多而变小, 气密性能变好, 但变好的幅度逐渐趋缓。

3) 激光扫描圈数只有 1 圈时, 不能得到有效的气密性键合; 激光键合路径不能太靠近中心腔体边缘, 否则易出现裂纹, 导致完全破坏键合的气密性。

5.3 键合材料断面 EDS 表征

EDS 是分析样品的化学元素组成的常用技术。通过高能带电粒子束如电子、质子或 X 射线源激发样品, 将原子内层电子激发到外层并在原电子位置产生空穴, 然后外层高能级电子跃迁填充内层空穴并释放能量, 能量以 X 射线的形式发射。由于每种元素都具有独特的原子结构, 从样品发出的 X 射线的数量和能量是原子结构的差异表征, 用能谱仪测量后可以用来分辨样品的元素组成。EDS 可作为独立的系统使用, 但通常安装在扫描电镜 (SEM) 上与其一起使用。使用 Hitachi S-4800 型场发射扫描电镜 (FESEM) 配备的 EDS 能谱仪对 Nd:YAG 激光键合 Si/Glass 的界面进行断面成分扫描。先制作键合断面的树脂显微剖样, 键合片切片后被竖直固化在树脂块中, 对树脂端面进行粗磨、细磨、抛光后得到键合样品光滑横截面。

图 18 所示为显微剖样在 SEM 下 1000 倍的放大图, 左边为 Pyrex 玻璃层, 右边为 Si 层, 在 20 kV 的加速电压下, 两层界面分隔对比明显, 图中带箭头线为线扫描路径, 路径长度约 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 。

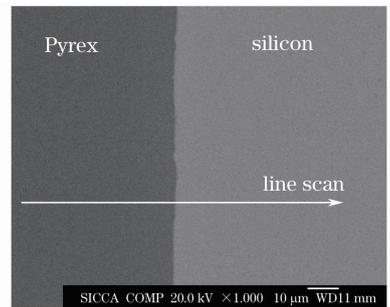


图 18 Si/Glass 键合片树脂显微剖样 SEM 局部放大
Fig. 18 SEM of Si/glass laser bonding interface

图 19 为 EDS 线扫描得到的能谱图 (彩图请见电子版), 蓝色谱线表示 Si 元素的相对含量计数, 红色谱线表示 O 元素的相对含量计数, 左边部分 O 含量高, Si 含量低, 为玻璃层, 而右边部分 Si 含量高, O 含量几乎为 0, 为硅层。中间过渡部分即本文关

注的键合扩散部分,这部分厚度测得为 $9\ \mu\text{m}$,与 $30\ \text{W}$ 的连续 Nd:YAG 激光键合的仿真结果吻合。从过渡层的元素分布看,两种材料发生了平稳的扩散现象,说明发生了有效的键合。激光提供的能量加速了两种键合材料界面的互相熔融扩散,但全面的激光键合机理,还有待进一步深入研究。

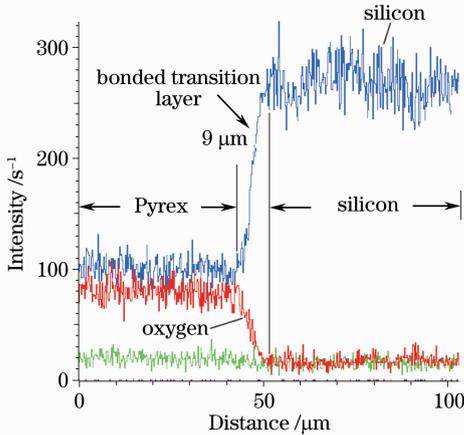


图 19 键合端面 EDS 线扫描能谱图

Fig. 19 EDS line scan spectrum of bonding interface

6 结 论

使用傅里叶传热公式建立了 Si/Glass 激光键合的理论解析模型,并应用 ANSYS 有限元方法数值仿真了移动的 $1064\ \text{nm}$ 连续 Nd:YAG 高斯激光键合 Si/Glass 的温度场,总结了 Si 和 Pyrex 7740 玻璃在 $0\ ^\circ\text{C}\sim 1800\ ^\circ\text{C}$ 范围内随温度变化的密度、比热容及热传导系数等非线性热学特性。采用加热区域单独建模方法实现了可控的局部细化网格划分,采用循环加载及不均匀载荷模拟移动的高斯热源,计算了 $20\sim 48\ \text{W}$ 激光功率作用下键合界面的熔融深度变化及最高温度变化,仿真得到键合阈值功率为 $28\ \text{W}$,并预测 $30\ \text{W}$ 时的激光键合扩散深度为 $9\ \mu\text{m}$ 。为 MEMS 技术中有关 Si 和 Pyrex 玻璃的热学分析提出了参考模型,对高斯热源激光穿透键合实验具有指导意义。

自主设计的激光键合系统实现了 Si/Glass 的激光键合,采用表面活化工序预键合 Si/Glass 可形成良好接触。激光键合获得归一化键合强度最大 $30.5\ \text{MPa}$,比同等条件下阳极键合归一化强度 $5.9\ \text{MPa}$ 高 417% 。激光直接键合密封腔体归一化漏率平均值约 $9.29\times 10^{-9}\ \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,相比阳极键合的 $1\times 10^{-9}\ \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,处于同一数量级,表明激光键合气密性变好。采用 EDS 线扫描激光键合 Si/Glass 界面的断面材料成分,键合过渡层厚度 $9\ \mu\text{m}$,

与仿真结果吻合。键合强度及气密性测试结果表明激光键合可以获得类似甚至优于阳极键合的有效键合,同时激光键合还具有局部高温及加工迅速的优点,是一种具有应用前景的 MEMS 硅-玻璃键合技术。

参 考 文 献

- Xu Tairan. MEMS Packaging[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006
- 徐泰然. 微机电系统封装[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- Nie Lei. Research on Theory and Technology of Low Temperature Wafer Bonding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007
- 聂磊. 低温圆片键合理论与工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007
- Y. T. Cheng, L. Lin, K. Najafi. Localized silicon fusion and eutectic bonding for MEMS fabrication and packaging[J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 2000, **9**(1): 3~8
- C. Luo, L. W. Lin. The application of nanosecond-pulsed laser welding technology in MEMS packaging with a shadow mask[J]. *Sensors and Actuators A.*, 2002, **97**(8): 398~404
- U. M. Mescheder, M. Alavi, K. Hiltmann *et al.*. Local laser bonding for low temperature budget[J]. *Sensors and Actuators A.*, 2002, **97**(8): 422~427
- A. W. Y. Tan, F. E. H. Tay. Localized laser assisted eutectic bonding of quartz and silicon by Nd:YAG pulsed-laser[J]. *Sensors and Actuators A.*, 2005, **120**(2): 550~561
- S. Theppakuttai, D. B. Shao, S. C. Chen. Experimental investigation and numerical simulation of glass-silicon bonding by localized laser heating[C]. Proc. ASME Int. Mech. Eng. Cong., 2003. 107~112
- A. A. Tseng, J. S. Park. Mechanical strength and interface characteristics of transmission laser bonding[J]. *IEEE Trans. Electronics Packaging Manufacturing*, 2006, **29**(3): 191~201
- M. J. Wild, A. Gillner, R. Poprawe. Locally selective bonding of silicon and glass with laser[J]. *Sensors and Actuators A.*, 2001, **93**(1): 63~69
- R. Witte, H. J. Herfurth, S. Heinemann. Laser joining of glass with silicon[C]. *SPIE*, 2002, **4637**: 487~495
- L. Sun, A. Malshe, S. Cunningham *et al.*. Localized CO₂ laser bonding process for MEMS packaging [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, **16**(s2): 577~581
- Yang Daohong, Dong Dianhong, Xu Chen *et al.*. Laser applications in bonding of MEMS [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, **25**(2): 143~146
- 杨道虹, 董典红, 徐晨等. 激光在 MEMS 键合技术中的应用[J]. *半导体光电*, 2004, **25**(2): 143~146
- J. S. Park, A. A. Tseng. Line bonding of wafers using transmission laser bonding technique for microsystem packaging [C]. LTherm'06, 2006, 1358~1364
- A. Okhotin, A. Pushkarskii, V. Gorbachev. Thermophysical Properties of Semiconductors[M]. Moscow: Atom Publ. House, 1972
- C. Glassbrenner, G. A. Slack. Thermal conductivity of silicon and germanium from 3 K to the melting point[J]. *Phys. Rev. A.*, 1964, **134**(4): 1058~1069
- E. Yamasue, M. Susa, H. Fukuyama *et al.*. Thermal conductivities of silicon and germanium in solid and liquid states measured by non-stationary hot wire method with silica coated probe[J]. *J. Cryst. Growth*, 2002, **234**(1): 121~131
- B. R. Hollis. User's Manual for the One-Dimensional Hypersonic Aero-Thermodynamic (1DHEAT) Data Reduction

- Code[R]. NASA Contractor Report, 1995, CR-4691
- 18 C. G. Miller III. Comparison of Thin-Film Resistance Heat-Transfer Gages with Thin-Skin Transient Calorimeter Gages in Conventional Hypersonic Wind Tunnels[R]. NASA STI/Recon Technical Report, 1981. 14474
- 19 M. Frewin, D. Scott. Finite element model of pulsed laser welding[J]. *Welding Journal*, 1999, **78**(s): 15~22
- 20 A. Mian, T. Mahmood, M. R. Amin *et al.*. Finite element modeling of transmission laser microjoining process [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, **186**(1-3): 37~44
- 21 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **35**(11): 1801~1807
刘会霞, 邢安, 张惠中等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2009, **35**(11): 1801~1807
- 22 B. Acherjee, A. Kuar, S. Mitra *et al.*. Finite element simulation of laser transmission welding of dissimilar materials between polyvinylidene fluoride and titanium[J]. *International J. Engineering, Science and Technology*, 2010, **2**(4): 176~186
- 23 Hao Guoming, Zhao Jian, Li Jianqiang. Dynamic simulation of the temperature field of stainless steel laser welding [J]. *Materials & Design*, 2007, **28**(1): 240~245
- 24 Ma Ziwen, Tang Zirong, Liao Guanglan *et al.*. Pressure-free localized laser bonding for silicon and glass [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2007, **28**(2): 217~221
马子文, 汤自荣, 廖广兰等. 无压力辅助硅/玻璃激光局部键合[J]. *半导体学报*, 2007, **28**(2): 217~221
- 25 Nie Lei, Shi Tielin, Tang Zirong *et al.*. Application of surface activation in local laser bonding [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(5): 476~478
聂磊, 史铁林, 汤自荣等. 表面活化处理在激光局部键合中的应用[J]. *激光技术*, 2007, **31**(5): 476~478
- 26 Zhang Zhiqiang, Xu Jing, Li Shaoliang *et al.*. Hermeticity simulation of chip-scale atomic clock [J]. *Chinese J. Vacuum Science and Technology*, 2012, **32**(2): 132~139
张志强, 徐静, 李绍良等. 芯片级原子钟的气密性能分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, **32**(2): 132~139

栏目编辑: 宋梅梅