

# 激光键合的有限元仿真及工艺参数优化\*

马子文 汤自荣 廖广兰<sup>†</sup> 史铁林 聂磊 周平

(华中科技大学机械科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 在硅/玻璃激光键合中, 温度场的分布是影响晶片能否键合的关键因素. 本文利用有限元法建立了移动高斯热源作用下硅/玻璃激光键合的三维温度场数值分析模型. 运用该模型计算了不同的工艺参数条件下硅/玻璃的温度场分布, 并由此得出键合线宽. 然后通过漏选试验确定影响激光键合的主要工艺参数有激光功率、激光扫描速度及键合初始温度. 最后通过对仿真结果进行回归分析, 得到激光键合工艺的最优参数, 为进一步研究激光键合工艺提供了理论依据.

**关键词:** 激光键合; 有限元法; 回归分析; 键合线宽

EEACC: 2530B

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)06-0995-06

## 1 前言

在微机电系统(MEMS)制造与封装中, 用得最多的材料组合是硅和玻璃. 由于硅具有良好的机械性能, 而玻璃具有电绝缘性、良好的透光性、高机械强度及化学稳定性, 为此硅和玻璃的键合工艺成为微机电系统封装工艺研究的重点. 目前硅和玻璃的键合工艺主要有直接/共熔键合和阳极键合. 阳极键合需要施加强电场(电压大约为 1000V)<sup>[1]</sup>, 而直接键合通常需要很高的退火温度(1100°C)<sup>[2]</sup>. 因此, 在集成了金属薄膜的压力、化学和热传感 MEMS 器件中, 这两种键合工艺不再适用. 同时, 由于阳极键合和直接键合工艺是对整个晶片施加场作用, 不能对晶片进行选择性的键合, 键合面积和热影响区不能得到控制. 因此, 为了使对温度和电场有特殊要求器件的性能免受影响, 提出了一种只在特定区域施加高温而晶片整体保持低温的键合方法<sup>[3]</sup>, 包括局部共晶键合<sup>[4~6]</sup>, 局部熔融键合<sup>[7]</sup>, 局部焊接键合<sup>[8]</sup>. 这些局部键合方案取得了成功, 其共性点之一都采用电阻加热, 而在许多情形下电阻加热并不合适, 为此引入激光键合. 激光具有优良的传输和聚焦特性, 通过使用激光辅助键合, 可以克服上述缺点.

激光键合的原理是利用激光与物质相互作用的热效应实现微系统器件的局部加热键合. 由于激光具有良好的聚焦特性, 因此可以使被照射区域的温度在很短的时间内急剧上升, 而晶片的整体保持较低的温度. 在激光键合中, 晶片温度场的分布是影响

晶片键合与否的关键因素, 它直接决定激光键合的线宽、键合强度、残余应力. 晶片高温区过大会影响器件中的温度敏感材料, 键合温度过低则硅和玻璃无法发生键合. 实验表明晶片的温度场与激光工艺参数(如激光功率、激光扫描速度、晶片初始温度)及键合环境有关<sup>[9]</sup>. 该键合方法已取得成功, 但激光键合过程中晶片内部的温度场分布并不清楚. 为了研究激光键合的温度场分布, 本文采用有限元法对晶片的温度场分布进行仿真, 同时为了探讨激光键合工艺参数及键合环境对键合温度场分布的影响, 本文使用了试验设计方法(DOE), 并对仿真数据进行回归分析, 从而找到激光键合的最优工艺参数.

## 2 激光键合的有限元仿真

图 1 为激光辅助硅/玻璃键合的示意图. 其中玻璃为 Pyrex 7740, 玻璃和硅片被切割为 10mm × 10mm 的方片, 玻璃和硅的厚度分别为 525 和 380 $\mu\text{m}$ . 玻璃和硅的界面位于  $x$ - $y$  平面, 激光垂直该平面进行扫描. 在仿真模型中, 设定激光功率、激光扫描速度、晶片初始温度、键合环境为变量. 其中键合环境通过设置模型边界的不同空气对流系数来模拟. 激光的光斑直径为定值——200 $\mu\text{m}$ .

硅和玻璃的热物性参数随温度变化很大, 其中硅在室温下的热导率大约是 1000°C 时热导率的 5 倍<sup>[10]</sup>. Pyrex 7740 玻璃靠近软化点温度的热导率大约是其室温下热导率的 2 倍<sup>[11]</sup>. 材料的热物性参数对激光键合的热影响区大小有重要影响, 为此必须

\* 国家重大基础研究(批准号:2003CB716207)和国家自然科学基金(批准号:50405033)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: g. l. liao@mail. hust. edu. cn

2006-11-15 收到, 2007-02-14 定稿

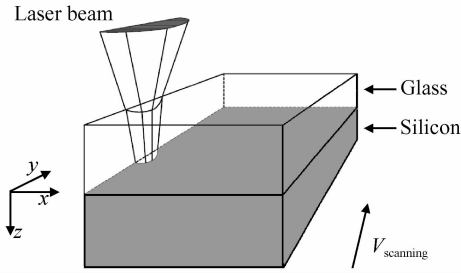


图 1 激光辅助硅/玻璃键合的示意图

Fig. 1 Schematic geometry of localized laser bonding for glass and silicon

表 1 硅和玻璃的热物性参数

Table 1 Material thermal properties of silicon and Pyrex 7740 glass

| 参数                      | 硅  | Pyrex 7740 玻璃  |
|-------------------------|--|--|
| 热导率/(W/(m·K))           | $802.99 \times 10^2 T^{-1.22}$ <sup>[10]</sup> | $1.052 - 9.439 \times 10^{-17} T + 3.663 \times 10^{-6}$ <sup>[11]</sup> |
| 比热容/(J/(kg·K))          | $641 + 2473 \times 10^{-4} T$ <sup>[10]</sup>  | 750 <sup>[13]</sup>  |
| 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 2330 <sup>[12]</sup>                           | 2230 <sup>[13]</sup>   |

在模型中考虑材料热物性参数的温度相关性,以提高激光键合模拟的精确度.从 Borisneko<sup>[10]</sup>和 Kingery 等人<sup>[11]</sup>的研究文献中得到硅和玻璃的热物性参数与温度的函数关系,如表 1 所示.

本文使用有限元分析软件 ANSYS 进行温度场的仿真.使用的单元类型为八节点六面体单元 SOLID70 和十节点四面体单元 SOLID87.构建有限元模型采用了自顶向下的方法,为了减少单元数目,提高计算速度,采用了分块和过渡单元的建模方法,即激光照射区与远离激光照射区使用不同的体块建模,而过渡区域则采用 SOLID87 单元.结合实际模型的对称特性,取实体的一半进行建模,其中对称面为激光扫描移动所形成的平面,即图 1 中的 y-z 平面.建立的有限元模型如图 2 所示.

激光键合的仿真为瞬态温度场问题,热源模型的选取对于瞬态温度场的精度,特别是靠近热源

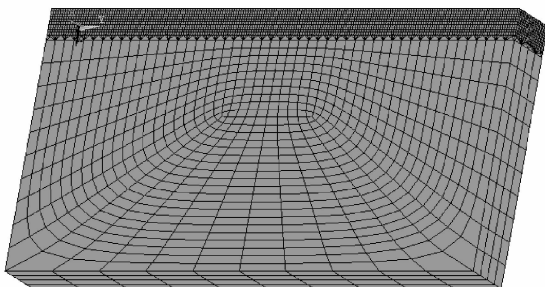


图 2 有限元网格划分图

Fig. 2 Representative finite element discretizations for the geometry

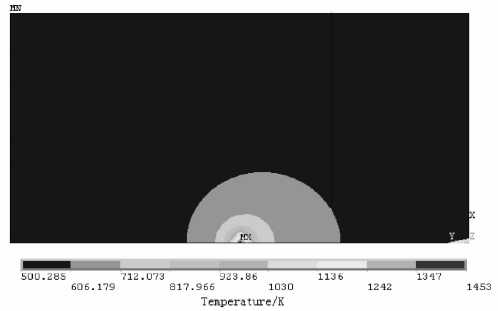


图 3 硅/玻璃界面处温度场分布图

Fig. 3 Temperature distribution at the interface of glass and silicon

区域的温度有很大影响.这里假设激光束的能量恒定,激光热源为高斯分布<sup>[14]</sup>:

$$P(x, y, z) = \frac{P_0}{\pi\omega^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right] \quad (1)$$

式中  $P_0$  为激光功率; $\omega$  为高斯光束的半径.由于硅对 1064nm 波长的激光吸收率很大<sup>[15]</sup>,当激光透过玻璃照射到硅表面上时,激光能量将在距硅非常近的表层被完全吸收.因此,可以将激光对硅的热作用等效为二维面热源.为建立激光照射扫描的动态模型,本文利用表格的方式实现热源的移动加载.具体的方法是先确定每个载荷步加载时刻的载荷位置和大小,每进行一次加载,移动一个单元格,同时删除上一步所施加的载荷,从而实现激光照射的动态模拟.

为使得模型中每一节点的热平衡方程具有唯一解,需要附加一定的边界条件和初始条件.在硅和玻璃的外表面,空气对流、键合片表面的热辐射和键合设备的热传导都会使键合片散发一部分热量,但由于热辐射的热量比键合片吸收的热量小几个数量级<sup>[16]</sup>,因此可忽略热辐射对键合片温度场的影响.为了模拟空气对流及键合设备的热传导对键合片的影响,同时为了简化模型,以设置不同的对流系数来模拟代替键合环境对键合片的影响.由于激光移动热源以对称面对称分布,所以根据模型的对称性及内热源强度为正,可判断最大温度必出现在该对称面上,满足  $\partial T / \partial x = 0$ ,因此对称面可视为绝热平面.

### 3 有限元仿真结果

图 3 为在激光功率  $P = 30\text{W}$ ,扫描速度  $v = 5\text{mm/s}$ ,初始温度  $T_0 = 473\text{K}$  条件下的温度场分布图.从图中可以看出,等温线呈椭圆形,在移动热源的前进方向等温线密集,温度梯度较大,在热源前进方向的相反方向等温线较稀疏,温度梯度较小.

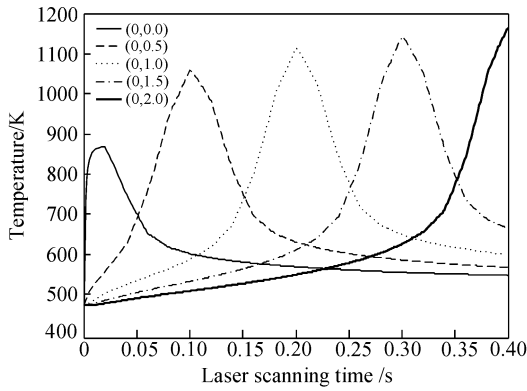


图 4 激光扫描线上等间距 5 点的温度-时间曲线

Fig.4 Temperature history of equidistant five node in laser track during the scanning time

图 4 为激光扫描线上等间距 5 点的温度随时间的变化曲线,由图可以看到除激光作用的起始点外,其他 4 点从初始温度经过最高温度降低到稳定温度所用的时间基本相同,即玻璃/硅键合的退火时间一致,这有利于保证激光键合的质量.从图也可以看出,随着时间的推移,各点的最高温度很快趋于稳定,即键合片的温度场达到准稳态,在实验中即表现为键合线宽保持不变.图 5 为在玻璃/硅键合界面处不同时刻过热源中心点与对称面垂直线上各点的温度分布图,图中显示高温区只集中在很小区域,键合片的大部分区域保持较低的温度.如果以温度 833K 即玻璃的退火温度为玻璃和硅的键合阈值温度,可以得到图中所示的键合线宽大约为  $300\mu\text{m}$ .图 6 为在激光功率为 30W,初始温度为室温的条件下,实验结果与仿真结果的线宽-扫描速度曲线图.从图可以看到,实验结果与仿真结果吻合得很好.

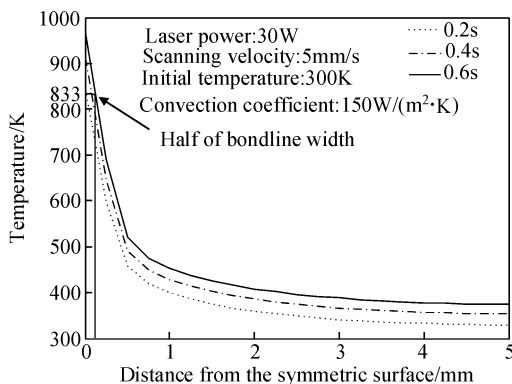


图 5 不同时刻  $x$ - $y$  平面内过热源中心的直线上各点的温度分布

Fig.5 Temperature distribution of nodes through the center of thermal resource in the  $x$ - $y$  plane

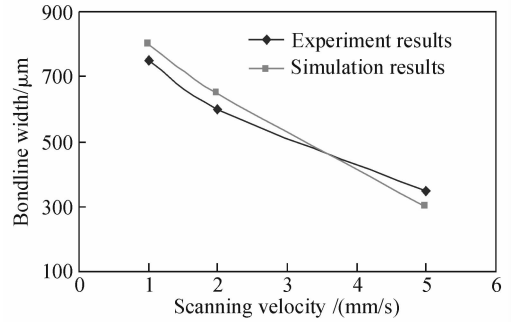


图 6 实验结果与仿真结果的比较

Fig.6 Comparison of experiment results and simulation results

表 2 漏选试验的参数及其水平数

Table 2 Parameters and levels for the scanning experiment

| 参数符号                           | 因子水平 |     |
|--------------------------------|------|-----|
|                                | 1    | 2   |
| A 激光功率/W                       | 20   | 30  |
| B 激光扫描速度/(mm/s)                | 1    | 5   |
| C 初始温度/K                       | 300  | 473 |
| D 键合环境/(W/(m <sup>2</sup> ·K)) | 50   | 150 |

## 4 仿真结果的统计分析

激光键合的最高温度是决定激光键合成功与否的关键因素.键合最高温度应高于玻璃的退火温度,使玻璃能发生部分变形从而与硅紧密结合.为了揭示键合最高温度与键合工艺参数的关系,对仿真结果进行了统计分析.为了尽量减少试验次数且使回归方程计算简单,采用了试验设计(DOE)方法.

### 4.1 漏选试验

漏选试验<sup>[17]</sup>的目的是确定激光键合最高温度的主要影响因子,以减少对影响因子的研究个数.漏选实验采用的是  $2^4$  析因设计.漏选试验的参数及其水平数如表 2 所示.

表 3 最高温度的方差分析

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for maximum temperature

| 方差来源  | 平方和 S                | 自由度 f | 均方 $\bar{S}$         | F 值    | 显著性 |
|-------|----------------------|-------|----------------------|--------|-----|
| A     | $1.3495 \times 10^6$ | 1     | $1.3495 \times 10^6$ | 6800.7 | **  |
| B     | $1.1828 \times 10^6$ | 1     | $1.1828 \times 10^6$ | 5960.6 | **  |
| C     | $4.7146 \times 10^5$ | 1     | $4.7146 \times 10^5$ | 2375.9 | **  |
| D     | 9260.7               | 1     | 9260.7               | 46.669 |     |
| A × B | $1.6223 \times 10^5$ | 1     | $1.6223 \times 10^5$ | 817.56 | *   |
| A × C | 10900                | 1     | 10900                | 54.93  |     |
| A × D | 674.83               | 1     | 674.83               | 3.4008 |     |
| B × C | 10708                | 1     | 10708                | 53.961 |     |
| B × D | 5567.8               | 1     | 5567.8               | 28.059 |     |
| C × D | 831.89               | 1     | 831.89               | 4.1923 |     |
| 误差    | 992.16               | 5     | 198.43               |        |     |

表 4 仿真结果的回归设计

Table 4 Regression design for simulated results

| 试验号 | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_1x_2$ | $x_1x_3$ | $x_2x_3$ | $x_1x_2x_3$ | Y<br>(最高温度/K) |
|-----|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|---------------|
| 1   | 1     | 1     | 1     | 1     | 1        | 1        | 1        | 1           | 1410.7        |
| 2   | 1     | 1     | 1     | -1    | 1        | -1       | -1       | -1          | 963.36        |
| 3   | 1     | 1     | -1    | 1     | -1       | 1        | -1       | -1          | 2038.6        |
| 4   | 1     | 1     | -1    | -1    | -1       | -1       | 1        | 1           | 1729.3        |
| 5   | 1     | -1    | 1     | 1     | -1       | -1       | 1        | -1          | 974.25        |
| 6   | 1     | -1    | 1     | -1    | -1       | 1        | -1       | 1           | 645.02        |
| 7   | 1     | -1    | -1    | 1     | 1        | -1       | -1       | 1           | 1240.5        |
| 8   | 1     | -1    | -1    | -1    | 1        | 1        | 1        | -1          | 1010.8        |

从表 3 可以看出,影响键合最高温度的主要参数为激光功率、激光扫描速度及初始温度,而键合环境对激光键合影响不大.

### 4.2 回归设计与分析

确定了激光键合的主要影响因子以后,利用一次回归的正交设计安排试验点和试验次数<sup>[18]</sup>.回归设计采用正交表  $L_8(2^7)$ ,回归设计实验数据如表 4 所示.实验设计中的参数变量、编码及水平数列于表 5.

根据表 4 的数据结果可以得到键合最高温度一次回归方程为:

$$\hat{y}_{tem} = 1251.6 + 283.92x_1 - 253.23x_2 + 164.45x_3 - 95.226x_1x_2 \quad (2)$$

其中  $\hat{y}_{tem}$  为键合最高温度,  $x_1 = (A - 25)/5$ ,  $x_2 = (B - 3)/2$ ,  $x_3 = (C - 386.5)/86.5$ . 变换后的回归方程为

$$\hat{y}_{tem} = -1237.1 + 85.35A + 111.45B + 1.9C - 9.52AB \quad (3)$$

### 4.3 仿真结果与回归模型比较

为了评估回归模型的精确度,利用回归方程描述的曲线对仿真结果做了比较.仿真结果与回归模型的曲线如图 7 所示,其中仿真数据与回归曲线是在激光功率为变量,其他参数如激光扫描速度  $B = 1\text{mm/s}$ ,初始温度  $C = 473\text{K}$ ,键合环境  $D = 50\text{W}$

表 5 回归设计中的参数变量、编码及水平数

Table 5 Parameters, variable coding and levels for regression design

|               | 实际变量及水平     |                  |               | 编码变量及水平 |       |       |
|---------------|-------------|------------------|---------------|---------|-------|-------|
|               | A, 功率<br>/W | B, 速度<br>/(mm/s) | C, 初始<br>温度/K | $x_1$   | $x_2$ | $x_3$ |
| 间距 $\Delta_j$ | 5           | 2                | 86.5          | 1       | 1     | 1     |
| 上水平 +1        | 30          | 5                | 300           | 1       | 1     | 1     |
| 下水平 -1        | 20          | 1                | 473           | -1      | -1    | -1    |
| 零水平           | 25          | 3                | 386.5         | 0       | 0     | 0     |

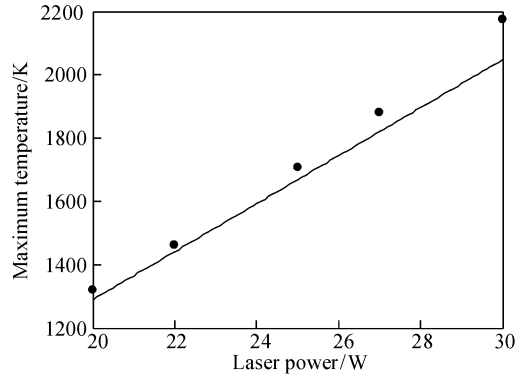


图 7 仿真结果与回归模型比较

Fig.7 Comparison between simulation results and regression model

( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )的条件下得到的.从图可以看到仿真结果与回归模型拟合得很好.

## 5 讨论

从表 3 知道影响激光键合最高温度的因素主要有激光功率、激光扫描速度和初始温度.为了揭示这些主要因素对最高温度的影响,利用回归方程式(3)取任意两个影响因素为变量,做出最高温度的等值线图,如图 8 和 9 所示.

从图 8 和 9 中可以看到,键合最高温度随激光功率、初始温度的增大而增大,随扫描速度的增大而变小.图 8 显示在激光功率为 20W,初始温度为 300K,扫描速度大于 3mm/s 时,键合最高温度小于 833K,此时硅和玻璃将无法发生键合,而当初始温度仍为 300K,激光功率大于 24W 时,在扫描速度为 1~5mm/s 的范围内,键合最高温度都大于 833K,

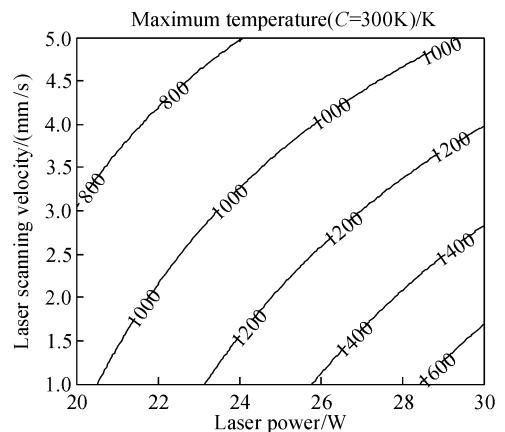


图 8 激光功率和扫描速度为变量的键合最高温度等值线图  
Fig.8 Contours of maximum temperature with laser power and scanning velocity

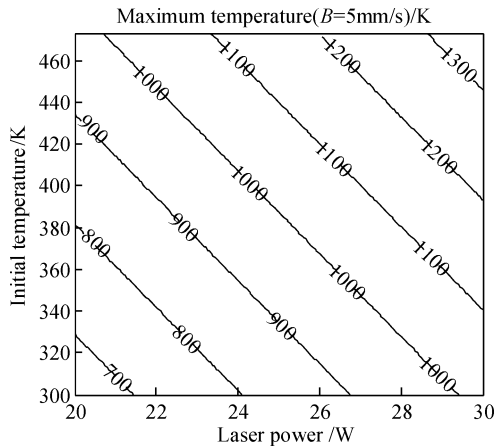


图 9 激光功率和初始温度为变量的键合最高温度等值线图  
Fig.9 Contours of maximum temperature with laser power and initial temperature

此时硅和玻璃都能很好地键合. 从图 5 可知, 在激光功率为 30W, 初始温度为 300K, 扫描速度为 5mm/s 时, 硅片和玻璃能发生键合且键合片整体温度保持在 400K. 根据以上的讨论结果, 如果初始温度保持室温, 扫描速度为 5mm/s, 激光功率取值在 24~30W 的范围内, 不仅能保证硅和玻璃很好键合, 且键合片的整体温度还能进一步降低. 从图 9 可以看到, 当激光扫描速度一定, 初始温度增大时, 键合所需激光功率随之减少, 键合片单位时间吸收的热量减小. 如果适当选择初始温度和激光功率, 在保证激光键合的基础上也能使键合片整体保持低温. 图 8 和 9 中键合最高温度小于 833K 的区域为硅和玻璃无法键合的区域, 为此需合理选择工艺参数使键合最高温度在键合阈值温度以上, 以保证硅和玻璃能够键合. 键合最高温度也与键合线宽有很大关系, 温度越高, 键合线宽就越大, 以上回归模型也可以为预测键合线宽做参考.

## 6 结论

激光硅/玻璃键合是微机电系统制造与封装的新型工艺, 由于键合方法设备简单且在局部温度控制及工作速度上有明显的优势, 而成为微机电系统封装工艺的研究热点. 激光键合的键合质量与键合片的温度场分布有重要的关系, 为了揭示激光键合工艺参数对温度场分布的影响, 本文通过有限元方法模拟了激光键合的温度场分布. 对仿真结果进行漏选试验得到影响激光键合质量的主要工艺参数有激光功率、激光扫描速度及键合初始温度. 在初始温度为室温 300K, 扫描速度为 5mm/s, 激光功率取值

在 24~30W 的条件下, 硅和玻璃都能键合, 且键合片整体都能保持低温. 本文建立的回归模型可为激光键合工艺参数的选取提供参考, 并可为进一步进行激光键合工艺研究提供理论依据.

## 参考文献

- [1] Wallis G, Pomerantz D. Field assisted glass-metal sealing. *J Appl Phys*, 1969, 40(10):3946
- [2] Lasky J. Wafer bonding for silicon-on-insulator technologies. *Appl Phys Lett*, 1986, 48(1):78
- [3] Lin L. MEMS post-packaging by localized heating and bonding. *IEEE Trans Adv Packaging*, 2000, 23(4):608
- [4] Ko W H, Suminto J T, Yeh G J. Bonding techniques for microsensors. *Micromachining and Micropackaging of Transducers*, New York: Elsevier, 1985
- [5] Lin L, Cheng Y T, Najafi K. Formation of silicon-gold eutectic bond using localized heating method. *Jpn J Appl Phys, Part II*, 1998, 37(11B):1412
- [6] Cheng Y T, Hsu W T, Najafi K, et al. Vacuum packaging technology using localized aluminum/silicon-to-glass bonding. *J Microelectromech Syst*, 2002, 11(5):556
- [7] Cheng Y T, Lin L, Najafi K. Localized silicon fusion and eutectic bonding for MEMS fabrication and packaging. *IEEE/ASME J Microelectromech Syst*, 2000, 9(1):3
- [8] Wassink R J K. *Soldering in electronics*. Scotland: Electrochemical Publications, 1984
- [9] Ma Ziwen, Tang Zirong, Liao Guanglan, et al. Pressure-free localized laser bonding for silicon and glass. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(2):217(in Chinese)[马子文, 汤自荣, 廖广兰, 等. 无压力辅助硅/玻璃激光局部键合. *半导体学报*, 2007, 28(2):217]
- [10] Borisenko V E, Hesketh P J. *Rapid thermal processing of semiconductors*. New York: Plenum, 1997
- [11] Hernlund J, Leinenweber K, Locke D, et al. A numerical model for steady-state temperature distributions in solid-medium high-pressure cell assemblies. *American Mineralogist*, 2006, 91:295
- [12] Lin S, Chu H S. Thermal uniformity of 12-in silicon wafer during rapid thermal processing by inverse heat transfer method. *IEEE Trans Semicond Manuf*, 2000, 13(4):448
- [13] <http://www.valleydesign.com/pyrex.htm>
- [14] Zheng Qiguang, Gu Jianhui. *Laser interaction with the material*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996(in Chinese)[郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996]
- [15] Siregar M R T, von Allmen M, Luthy W. Temperature dependence of optical absorption at  $\lambda=1.06\mu\text{m}$  in amorphous and crystalline silicon. *Helv Phys Acta*, 1979, 52:45
- [16] Chen G, Tien C L. Thermally induced optical nonlinearity during transient heating of thin films. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116(2):311
- [17] Montgomery D C. *Design and analysis of experiments*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1997
- [18] Mao Shisong, Ding Yuan, Zhou Jixiang. *Regression analysis and design*. Shanghai: East China Normal University Press, 1981(in Chinese)[谌诗松, 丁元, 周纪芾. 回归分析及其试验设计. 上海: 华东师范大学出版社, 1981]

## Finite Element Simulation and Process Optimization of Localized Laser Bonding\*

Ma Ziwen, Tang Zirong, Liao Guanglan<sup>†</sup>, Shi Tielin, Nie Lei, and Zhou Ping

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** The three dimensional temperature distribution of laser bonding with a Gaussian thermal source is modeled using the finite element method. In the model, the temperature distribution with different process parameters is simulated and the bondline width is obtained. Then the key process parameters of laser bonding, including laser power, scanning velocity, and initial temperature, are obtained with the help of scanning experiments. Finally, with regression analysis on the simulation results, a regression model is made and the optimal process parameters of laser bonding are found. This can provide a theoretical basis for further study on laser bonding.

**Key words:** laser bonding; finite element method; regression analysis; bondline width

**EEACC:** 2530B

**Article ID:** 0253-4177(2007)06-0995-06

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No.2003CB716207) and the National Natural Science Foundation of China (No.50405033)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: g.l.liao@mail.hust.edu.cn

Received 15 November 2006, revised manuscript received 14 February 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics