



圆片级感应局部加热封装研究

席炎炎^①, 罗小兵^{①②*}, 刘文明^②, 陈明祥^②, 刘胜^②

① 华中科技大学能源学院, 武汉 430074;

② 华中科技大学武汉光电国家实验室 MoEMS 研究部, 武汉 430074

* E-mail: Luoxb@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2009-04-05; 接受日期: 2009-06-08

国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2006AA04Z328)资助项目

摘要 提出一种 MEMS 高频电磁局部感应加热封装的方法, 并将其应用于圆片级感应局部加热封装. 为达到 MEMS 圆片级封装键合, 通过数值模拟和实验研究, 首先设计与优化感应器的结构, 其次验证 PCB 板在感应器内的加热情况, 初步实现了 MEMS 在均匀磁场中的均匀局部感应加热封装. 结果表明: 采用局部感应加热封装, 可有效降低封装过程中热对芯片的影响, 可大大减小芯片的热应力, 有效提高 MEMS 器件的寿命.

关键词

MEMS 封装
感应加热
数值模拟
结构优化

1 引言

MEMS(micro electric-mechanical systems)即机电系统, 一般认为它是由特征尺寸在亚微米至毫米范围内, 集微结构、微传感器、微执行器以及信号处理和电路甚至接口、通信和电源于一体的微型器件或系统. 一般认为, MEMS 应具有以下特点^[1-3]: 微型化; 以硅为主要材料, 机械电气性能优良; 可批量生产; 集成化; 多学科交叉等. MEMS 自 20 世纪 80 年代中后期崛起以来, 引起世界各国科学家的极大兴趣, 并在各国政府的巨额经费投入的推动下得到迅猛发展.

MEMS 封装技术主要来源于 IC 封装技术, 如低温焊料键合、玻璃焊料键合、共晶键合、粘胶键合等. 为了研究 MEMS 感应局部加热封装问题, 国内外不少研究者开展了相关感应加热问题的研究. 美国 Wisconsin 大学的 Thompson^[4]采用射频感应加热 3 寸和 4 寸的晶圆片, 在几秒钟内实现了硅-硅直接键合.

但由于采用圆盘型线圈, 整个晶圆片内的温度分布极不均匀. 2005 年我国台湾清华大学采用感应加热实现了微型红外探测器的局部加热封装^[5]. 该方法采用焊料回流, 形成的键合强度高(可达 18.3 MPa), 气密性良好. 实验过程中, 由于电源频率较低(400 kHz), 仅可用于单个大尺寸图形的低温焊料键合, 无法实现圆片级键合. Cao 等人^[6]选用频率为 14.2 MHz, 功率为 1000 W 的感应电源, 在 150 ms 内将厚度为 4 μm , 宽度为 30 μm 方形铝环升温到 1100 $^{\circ}\text{C}$, 热功率密度高达 $9 \times 10^{12} \text{ W/m}^3$, 由于感应加热对玻璃不起作用, 作为衬底的玻璃温度仅为 233 $^{\circ}\text{C}$, 从而实现了局部加热. Nguyen 等人^[7]利用电磁感应加热磁性材料产生局部高温配合直流高压电场, 用时约 2 min 完成 ITO 玻璃间的阳极键合. 另外, Lin^[8,9]提出各种其他的局部加热方式, 这些方式大多是利用多晶硅材料作为加热源. Sinder 等人^[10]通过理论计算和实验, 得出结论: 在纵向射频(RF)磁场中快速热处理(RTP)硅衬底上的导体薄膜是可行的. 徐霖等人^[11]通过模拟实验, 得到

在感应加热计算机模拟过程中, 模拟所取时间步长和网格粗细对感应加热的温度场及温度均匀性影响不大. 华中科技大学的刘文明等人^[12]通过数值模拟, 对 DBC(direct bond copper)圆片在均匀谐磁场载荷中的温度分布情况和圆片受热后产生变形等做了详细分析.

本文提出一种 MEMS 射频电磁局部感应加热封装的方法, 并将其应用于圆片级感应局部加热封装. 经过数值模拟, 设计优化了感应器结构, 制作了能够形成均匀磁场, 适合圆片级封装的组合型线圈. 通过模拟分析和实验验证, 初步实现了 MEMS 圆片级封装键合.

2 电磁感应加热原理和相关概念

2.1 电磁感应加热基本原理

电磁感应加热主要依据电磁感应、趋肤效应和热传导三项基本原理^[13]. 感应加热已经在工业界使用超过了 40 年, 其应用领域很广泛. 感应加热与传统的加热设备相比具有诸多优点: 加热温度高, 而且是非接触式加热, 这对结构复杂的腔体而言是十分优越的; 加热效率高, 节能; 加热速度快, 被加热物的表面氧化少; 容易实现自动控制; 作业环境好; 干净无污染.

感应加热原理如图 1 所示, 通过对线圈加载交变电流, 线圈内产生极性瞬间变化的强磁束, 将金属等被加热物质放置在线圈内, 磁束就会贯通整个被加热物质, 在被加热物质内部与加热电流相反的方向产生涡电流, 由于被加热物质内的电阻产生焦耳热, 使物质自身的温度迅速上升^[14].

工件放入感应线圈中, 当交变电流 i_1 通入感应线

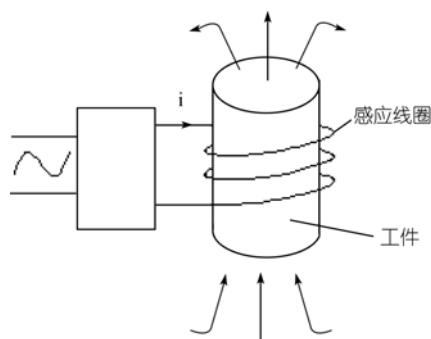


图 1 感应加热原理

圈时, 感应线圈内就会产生交变磁通 Φ , 工件受到电磁感应而产生感应电势 e , 两者与时间 t 的关系式为

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

负号表示感应电动势总是试图阻止磁通的变化. 设磁通幅值为 Φ_m , 磁场角频率为 ω , 频率为 f , 则有

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi_m \omega \cos \omega t.$$

e 的有效值为 $E = 4.44 f \Phi_m$.

感应电势 e 在工件中产生感应涡旋电流 i_2 , 由于工件的电阻产生焦耳热, 其热量 Q . 根据焦耳-楞茨定律, Q 的表达式为

$$Q = 0.24 I_2^2 R t,$$

式中, I_2 为感应涡旋电流有效值(A); R 为工件电阻(Ω); t 为时间(s). 工件获得的功率为

$$P = EI \cos \varphi = 4.44 f I \Phi_m \cos \varphi.$$

工件中产生的涡流由于趋肤效应, 沿横截面由表面至中心按指数规律衰减, 工程上规定, 当涡流强度从表面向内层降低到其数值等于最大涡流强度的 0.368 倍, 该处到表面的距离 Δ 称为电流透入深度. 由于涡流所产生的热量与涡流的平方成正比, 因此由表面至芯部热量下降速度要比涡流下降速度快的多, 可以认为热量(85%~90%)集中在厚度为 Δ 的薄层中. 透入深度 Δ 由下式确定:

$$\Delta = \sqrt{2\rho / \mu\omega} = \sqrt{\rho / \pi\mu_0\mu_r f} \text{ (mm)},$$

式中, ρ 为工件电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); μ_0 为真空磁导率($4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$); μ 为工件磁导率(H/m); μ_r 为工件相对磁导率; ω 为角频率(rad/s); f 为频率(Hz).

从上式可以看出, 当材料电阻率、相对磁导率给定后, 透入深度 Δ 仅与频率 f 的平方根成反比. 频率越高, 工件加热的厚度就越薄.

2.2 圆片级封装概念

一个 MEMS 器件, 如惯性传感器, 不仅在其使用过程中, 而且在其制造过程中, 都必须进行保护, 以避免加工工艺和环境对其造成损坏. 因此, 在圆片工艺, 即在所有的前道工艺完成之后, 这些器件很容易受到划片和组装等后序工艺的影响而损坏. 为了解决这些问题, 人们已开发了许多新的工艺和技术, 其中, 圆片级封装是一类重要的封装形式.

圆片级封装是指 MEMS 结构和电路的制作、封装都在硅圆片上进行, 封装完成后再进行切割, 形成单个的芯片(chip); 而划片级封装是指微结构和电路在硅圆片上完成后, 即进行切割形成划片(die), 然后对单个划片进行封装. 很明显, 圆片级封装的效率更高. 由于 MEMS 封装费用在整个器件制造成本中占了很大比例, 因此, 采用圆片级封装技术可以大大降低生产成本. 此外, 用圆片级封装还可以提高 MEMS 器件内部的洁净度, 防止其后进行的划片、分片工艺对 MEMS 器件内部易碎结构和敏感结构的破坏, 提高封装成品率和可靠性, 因而是一种降低封装成本的有效手段. 图 2 为圆片级封装与划片级封装的对比示意图.

2.3 圆片级均匀感应加热封装设计与优化

圆片级封装与单一器件封装(即划片级封装)有很大的区别. 在局部感应加热封装应用方面, 单一器件封装对磁场的均匀性没有要求, 在变化的磁场中即可完成封装. 而圆片级封装的目的是一次性封装多个芯片, 为保证封装后每个 MEMS 器件的性能相

同, 就要求每个键合环加热温度均匀一致, 即要求每个键合环上由于涡电流产生的焦耳热量一样, 而交流磁场中穿越每个键合环的磁通密度均匀一致是保证焦耳热量一样的前提. 温度均匀性一直是圆片级电磁感应加热封装的一个难题, 只有解决了这个问题, 才可能真正实现圆片级的电磁感应加热封装键合. 据以上分析, 圆片级感应局部加热封装应该在交变的匀强磁场中进行.

3 射频感应器和感应加热系统的研制

3.1 射频感应器的设计和制作

感应器的设计采用直径为 2.5 mm, 壁厚约为 0.3 mm 的紫铜管, 铜管外面套绝缘层. 感应器底部采用平面线圈, 周围采用螺线管线圈. 考虑射频感应系统阻抗匹配的要求, 设计感应器总匝数为 11 匝的组合型线圈. 实验时, 铜管上接交流电, 同时管内通水冷却, 如图 3.

设计出的组合型线圈轴对称平面图和磁场分布如图 4 所示.

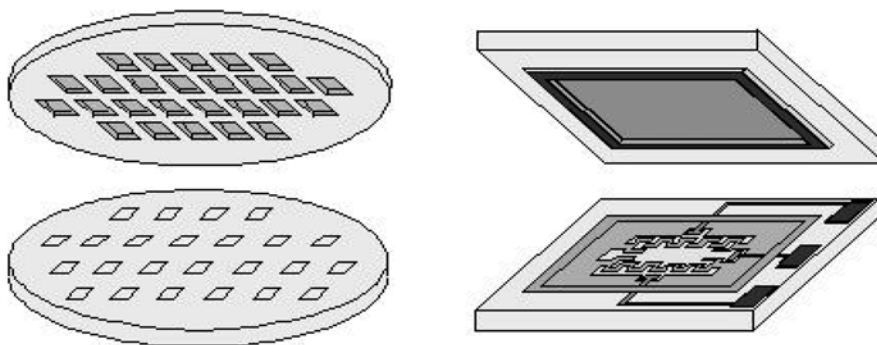
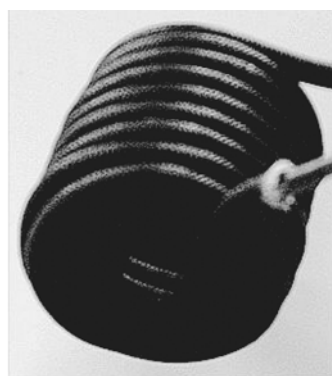


图 2 圆片级键合(wafer bonding)和划片级键合(die bonding)



Parameters
Interior diameter: 35 mm
Exterior diameter: 40 mm
Coil height: 36 mm
Copper diameter: 2.5 mm

Plan coil
Turn: 3
Spiral: 4.8 mm
Solenoid coil
Turn: 8
Spiral: 4.8 mm

图 3 11 匝组合线圈及其规格

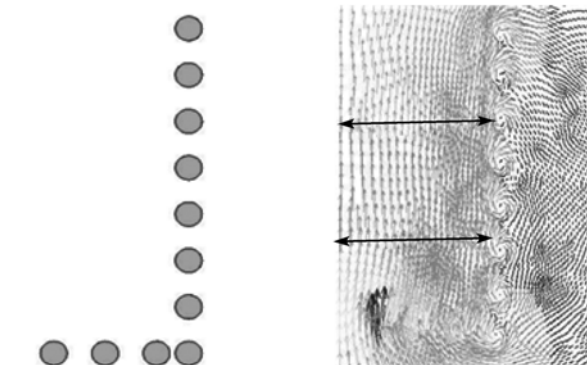


图 4 组合线圈及其内部磁场分布

一般感应加热均采用横模加热(即线圈产生的磁场与样品表面垂直), 给线圈加载频率 $f=13.56\text{ MHz}$, 电流密度 $J_s=2500\text{ A/m}^2$, 分析在不同的轴向高度(y 轴方向)下, 线圈中沿径向磁通密度(B , 单位: 10^{-6} T)的最大值、最小值、差值和差值与最大值的比值, 数据如表 1 所示。

数据显示在同一轴向高度上, 磁场分布比较均匀, 绝对误差小于 4%. 在距离线圈底端 12~17 mm 较大的范围内, 同一轴向上都可认为磁场均匀, 这对样品在磁场中的位置对准要求不高. 扁平状样品可安放于该区域. 实验时, 圆片位置要求较为宽松, 该组合线圈可较好满足圆片级感应局部均匀加热封装的要求。

3.2 感应加热系统

感应加热系统通常由感应电源、感应器(线圈)、加热样品(器件)和辅助装置(匹配器、水冷系统、测温计、传输线、样品传送机构等)组成, 如图 5. 实验装置设计如图 6 所示。

4 圆片级感应局部加热封装数值模拟

在 PCB 板上制作微小尺寸的图形, 工艺简单制作方便, 试验成本低. 工艺初, 设计采用制作了微小图形的 PCB 板做圆片级感应局部加热模拟分析. 图 7

表 1 组合型线圈内部磁通密度

轴向高度 (mm)	磁通密度(10^{-6} T)			
	最大值	最小值	差值	差值与最大值百分比
12	2.6992	2.5975	0.1017	3.8%
13	2.6562	2.5941	0.0621	2.3%
14	2.6175	2.5832	0.0343	1.3%
15	2.5797	2.5650	0.0147	0.6%
16	2.5718	2.5359	0.0359	1.4%
17	2.5831	2.5007	0.0824	3.2%

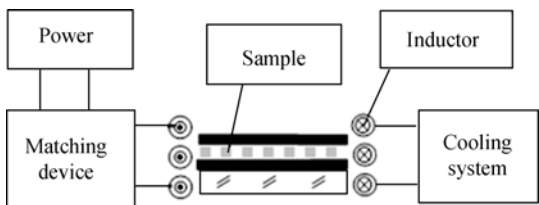


图 5 感应加热封装系统结构示意图

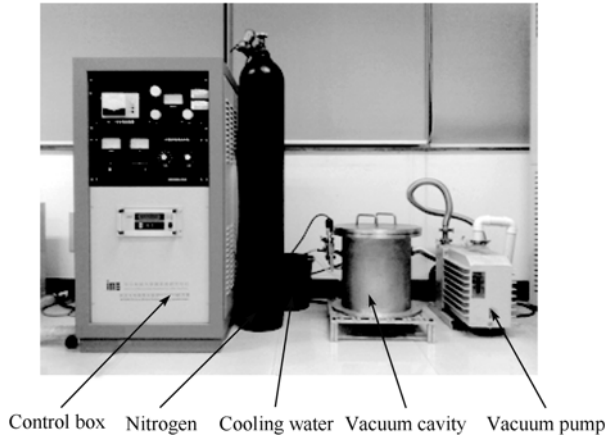


图 6 感应加热封装装置

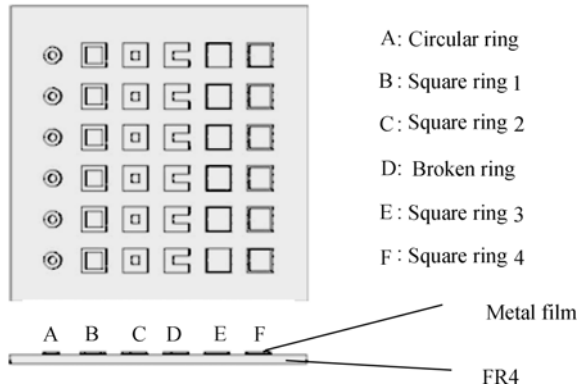
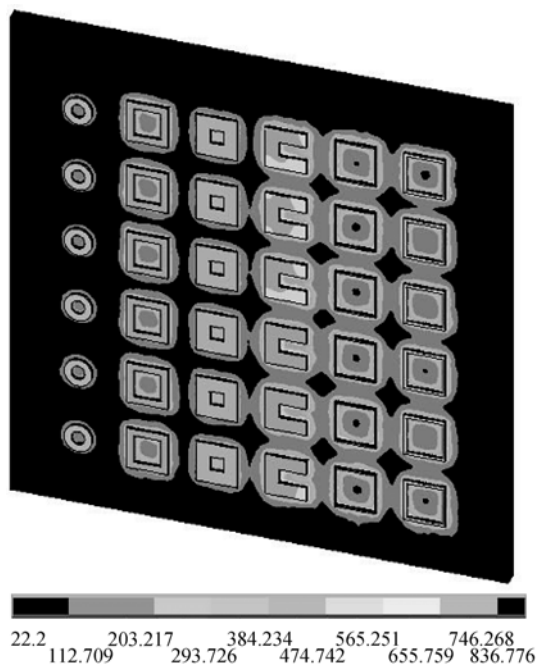


图 7 PCB 板上不同形状和线宽金属环的模型图

是分布了不同形状和线宽的金属环的 PCB 板, 目的在于研究不同的金属环形状和尺寸变化对局部感应加热的影响. PCB 基板上的金属图形总厚度均为 0.1 mm, 铜层厚度是 0.05 mm, 表面的锡环厚度是 0.05 mm. 圆形环的直径为 2 mm, 方形环的边长均为 3 mm, 线宽依次为 1, 0.5, 0.2 和 0.1 mm. 基板材料等级为 FR4, 厚度为 1 mm.

在 PCB 板上加载 $B=0.0125\text{ T}$, 沿 Z 方向的均匀磁场(保证磁力线垂直穿越各个金属环). 经电磁耦合后, 8 s 末 PCB 板的温度分布如图 8 所示. 由图 8 可知, 同种形状和尺寸的金属环在交变匀强磁场作用下, 温度很均匀. 初步证明在均匀交变磁场中, 圆片上每个相同形状和尺寸的键合环因涡电流产生的焦耳热量是相同的, 这将保证圆片级封装过程中每个芯片的封装质量均匀一致。

模拟分析相同形状, 不同线宽的金属环温度分布. 金属环阵列 C, B, F, E 的厚度一样, 线宽依次减

图 8 PCB 板温度分布云图($t=8$ s)

小(1, 0.5, 0.2 和 0.1 mm). 分析 0~8 s 内各种金属环的温度变化曲线, 如图 9 所示, 在相同的时间内, 键合环线宽越小, 环上温度越高.

5 圆片级感应局部加热封装试验

初始的圆片级感应局部加热试验采用制作了微小图形的 PCB 板代替圆片. 各种不同金属图形的 PCB 板如图 10 所示. PCB 基板由绝缘隔热、不易弯曲的材质(FR4)制成. 基板上按设计分布一层 0.05 mm 厚的铜膜阵列, 然后通过电镀在铜膜上沉积一层 0.05 mm 厚的锡膜.

实验采用 13.56 MHz 的射频电源, 功率调至 600 W. 电源通过同轴线电缆接头直接与感应线圈连接. 装置如图 11 所示.

将 PCB 板置于线圈后, 通过调整其高度(位于均匀磁场内), 实现各图形的均匀加热. 借助红外热像仪测温, 实验同步分析温度变化情况, 同时录入温度数据, 有效录制为 25 帧每秒.

图 10(a)是相同形状、不同大小金属环的 PCB 板, 线宽均为 0.2 mm, 边长分别是 3, 2, 1 和 0.5 mm. 实验过程中观察到的实时热像图如图 12 所示.

金属图形和 PCB 基板材料的发射率不同, 因此,

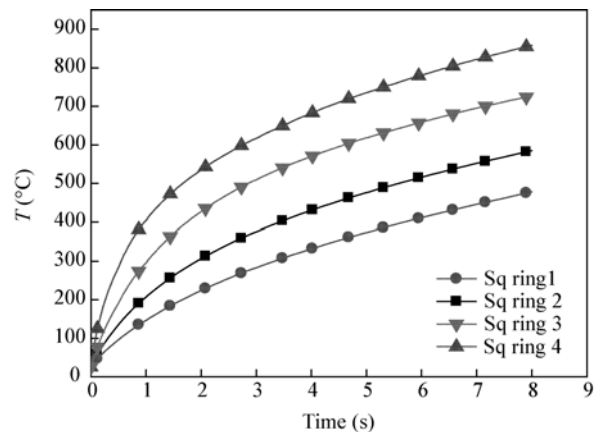


图 9 金属环阵列 C, B, F, E 的温度随时间变化曲线

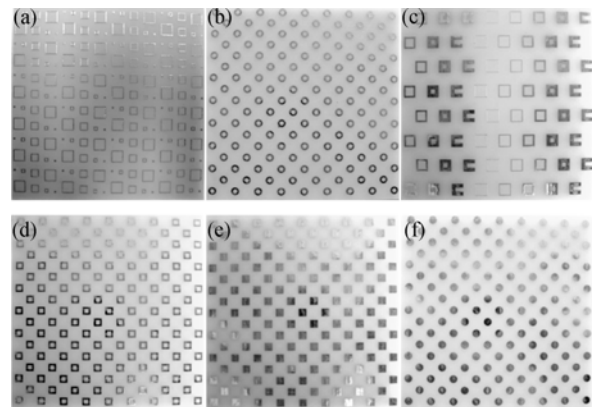


图 10 不同图形的 PCB 板

(a) 不同大小方形环; (b) 圆环形; (c) 不同线宽方形环; (d) 方形环; (e) 实心方块; (f) 实心圆形

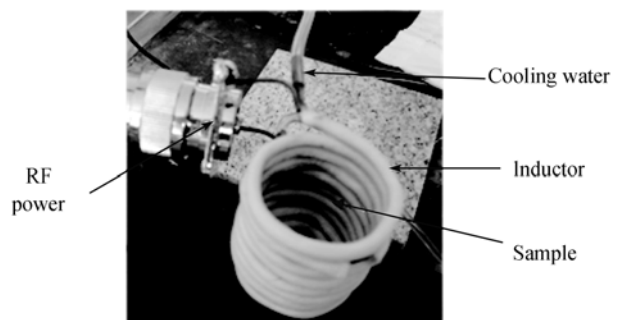


图 11 感应加热实验装置图

首先将整个 PCB 板表面用高温漆涂黑, 在 $t=0$ s 时, PCB 板的热像图显示为一个 20°C 的模糊整体. 0~3 s 内, 大环(边长为 3 mm, 线宽为 0.2 mm)的温度升高到 $T=376.03^{\circ}\text{C}$. 4 s 时左下角的大环因温度过高熔断.

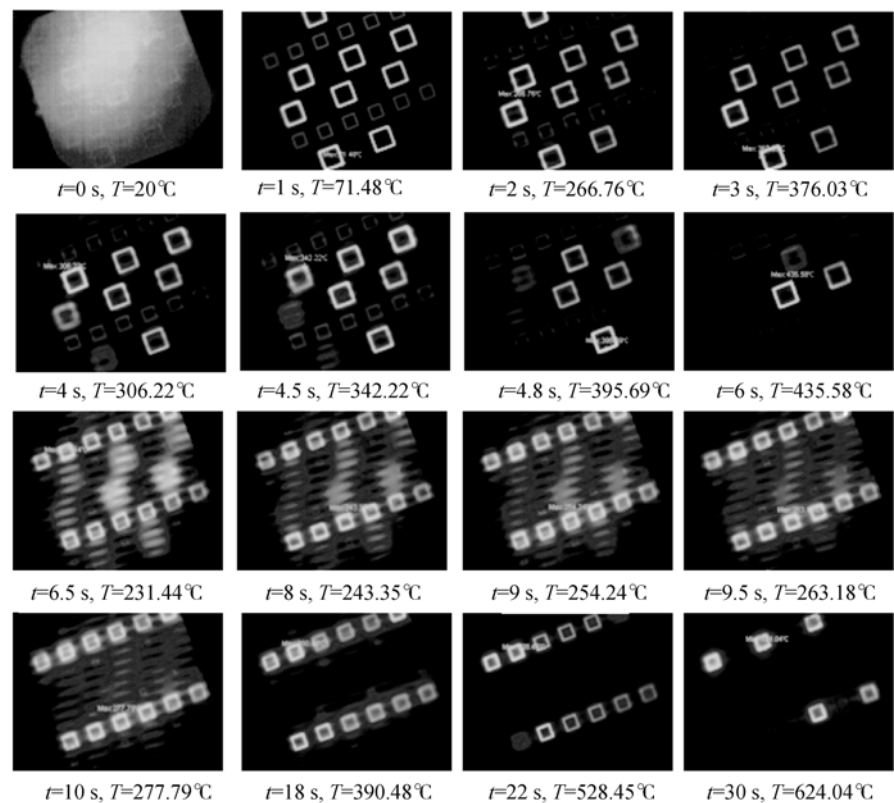


图 12 不同大小图形 PCB 板(图 10(a))的红外热像图
 t 表示加热时间(s), T 表示 PCB 板上的最高温度(°C)

4~6 s 内, 大环的温度逐渐升高到近 400℃. 在 6.5 s 末, PCB 板上大环都因温度过高而熔断, 此时中环(边长为 2 mm, 线宽为 0.2 mm)的温度逐渐升高, 6.5~10 s 内, 中环温度升高到 277.79℃, 而从 18 s 开始, 中环也会因温度过高逐渐熔断.

从红外热像图中可以看出, 0~30 s 内, 较小的环(包括边长为 1 和 0.5 mm 的环)相对于较大的环, 没有明显的加热现象. 这是由于电磁感应加热存在尺寸效应^[5], 当材料尺寸缩小时, 磁通量通过材料的面积减小, 从而导致小尺寸材料的感应加热效率较低, 相比之下大尺寸物体所感应出的热量会远高于小尺寸物体. 当射频电源的功率一定时, 图形上的升温一般与图形特征尺寸的四次方成正比. 较小的图形, 特征尺寸很小, 图形的温升也相对很小.

对于电磁感应局部加热封装, 封装温度的控制尤为重要, 温度过低会造成虚焊甚至无法实现键合, 过高会因为焊料的外溢造成键合强度下降. 在本试验中, 可通过调节射频源的功率和感应加热的时间

来控制金属环的温度. 如边长为 3 mm, 线宽为 0.2 mm 的锡金属环, 射频源功率调制 600 W, 只需加热 2 s, 就可达到锡的熔点 232℃.

探讨感应局部加热的选择性, 取环上一点 A 和环中心 PCB 板上的点 B, 如图 13 所示, 观察它们随时间的变化曲线. 在 7 s 末, A 点的温度线性增长到 350℃, B 点(通常是芯片区)温度约是 100℃. 两者接近 200℃ 的温差很好地阐释了电磁感应选择性加热的特点. A 点因为焦耳热瞬间升温, B 点因热传导缓慢升温, 器件在短暂的封装过程中, 芯片区的温度敏感电路将不会受到影响而保持低温.

感应局部加热试验中, 取穿过所有中环的一根线 L_{01} (如图 14 所示), 观察它们某一时刻的温度. 此时环上的温度在 120℃ 左右, 均匀性良好. 实验证实了相同形状和大小的金属环在组合型线圈内感应加热的温度均匀一致, 可以有效保证封装后每个器件的封装质量. 并且因为是同时被加热封装, 也可有效减小基板上的热应力.

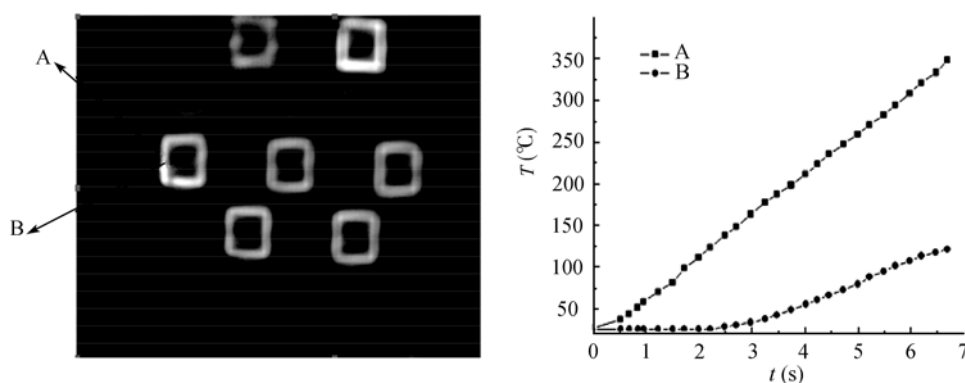
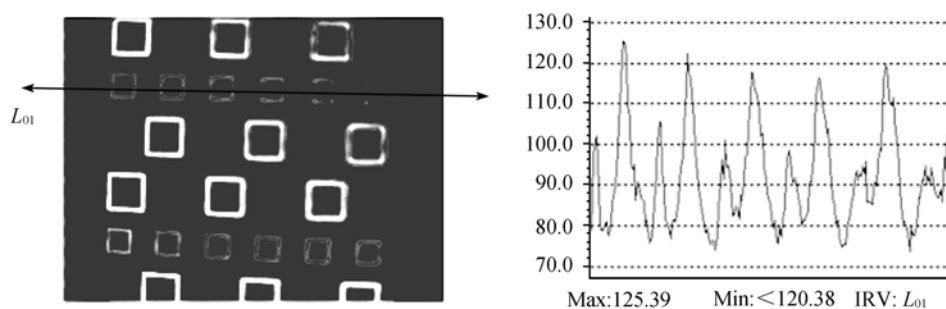


图 13 环上一点 A 和环中心点 B 随时间的温度变化曲线

图 14 穿越中环的 L_{01} 线上某时刻的温度分布

验证相同大小, 不同线宽图形感应局部加热效果, 设计如图 10(c)所示的 PCB 板(边长为 3 mm, 线宽分别为 1, 0.5 和 0.2 mm), 某一时刻的热像图如图 15 所示, 相同大小的图形, 线宽越窄, 图形的温升越高. 故在设计圆片级封装的时候, 应尽可能减小键合环的线宽. 但应注意线宽太小, 则温升太快, 容易发

生瞬间熔断的现象, 这对封装可靠性是不利的.

6 总结

本文提出一种 MEMS 射频电磁局部感应加热封装的方法, 并将其应用于圆片级系统封装. 首先介绍了电磁感应加热和圆片级封装的基本原理, 然后通过数值模拟, 对感应线圈的结构进行设计与优化, 得到均匀磁场, 其次模拟分析了 PCB 板在交变匀强磁场中的加热情况, 最后通过实验对整个方法加以验证. 结果发现: 在均匀的交变磁场中, MEMS 圆片级电磁局部感应加热封装是可行的, 选择性加热可有效降低封装过程中热对芯片的影响, 加热的均匀性可以有效减小芯片的热应力, 提高 MEMS 器件的寿命.

本论文目前只是通过 PCB 板探讨了将电磁感应加热运用于 MEMS 圆片级封装的可行性, 并没有完成以玻璃或以硅为基底的 MEMS 圆片的封装, 这将在下一步的工作中展开研究.

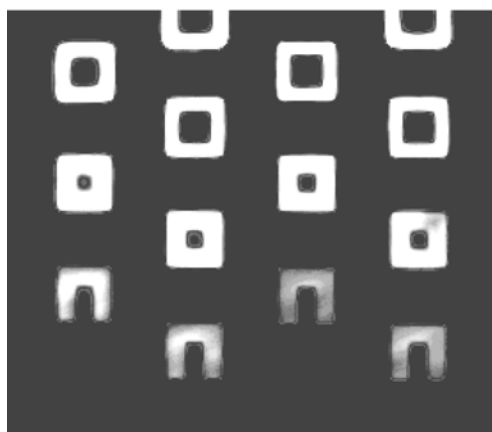


图 15 相同大小不同线宽图形某时刻的热像图

参考文献

- 1 王亚珍, 朱文坚. 微机电系统技术及发展趋势. 机械设计与研究, 2004, 20(1): 10—13
- 2 钟先信, 李建蜀, 肖沙里, 等. 微系统集成技术研究的动向. 光学精密工程, 1998, 6(4): 1—6
- 3 邓昭, 饶文琦, 任天辉. 微机电系统的微观摩擦学研究进展. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 494—498
- 4 Thompson K. Direct silicon-silicon bonding by electromagnetic induction heating. JMicroelectromech Syst, 2002, 11: 285—292
- 5 Yang H A. Analysis and Application of Electromagnetic Eddy Current for MEMS. Dissertation of Doctoral Degree. Taiwan: National Tsing Hua University, 2005
- 6 Cao A, Lin L W. Selective induction heating for MEMS packaging and fabrication. In: Proceedings of 2001 ASME. New York: ASME, 2001. 763—767
- 7 Nguyen T C C, Lin L. Vacuum packaging technology using localized aluminum/silicon to glass bonding. J MEMS, 2002, 11: 556—565
- 8 He G H, Lin L, Cheng Y T. Localized CVD bonding for MEMS packaging. In: International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers 99. Sendai, Japan, 1999. 1312—1315
- 9 Lin L. MEMS post-packaging by localized heating and bonding. IEEE Trans Adv Package, 2000, 23: 608—616
- 10 Sinder M, Pelleg J, Meerovich V, et al. RF heating of the conductor film on silicon substrate for thin film formation. Mater Sci Eng A, 2001, 302: 31—36
- 11 Xu L, Zhang H, Shao G J, et al. The simulation study on the technical parameters of induction heating to semi-solid aluminum alloy. Shanghai Metal, 2002, 24 (6): 1—6
- 12 Liu W M, Chen M X, Xi Y, et al. Thermo-mechanical analysis of a wafer level packaging by induction heating. Proc ICEPT-HDP. Shanghai, July, 2008. 1—5
- 13 约翰·戴维斯, 著. 感应加热手册. 张淑芳, 译. 北京: 国防工业出版社, 1985. 363—400
- 14 王知学. 控制技术在 GaN 薄膜生长过程中的应用. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2000