

硅通孔电迁移寿命评价系统设计^{*}张立廷¹ 龚涛^{1,2} 陈恩² 周斌² 卢向军¹(1. 厦门理工学院材料科学与工程学院 厦门 361024; 2. 工业和信息化部第五电子研究所电子元器件
可靠性物理及其应用技术实验室 广州 511370)

摘要: 由于缺乏专门的试验系统,三维封装中的硅通孔电迁移寿命评价往往需要借助多种设备和仪器,以应对不同试验需求,这不仅增加了试验的复杂性,还可能引入不确定性因素。以 LabVIEW 作为上位机软件开发平台,可编程控制器和工控机作为核心控制单元,联合精密电源、高精度万用表、继电器阵列、样品连接端等研发了 TSV 电迁移寿命评价系统,以确保对 TSV 电迁移试验过程中电压、电流等关键参数的准确采集和监测。借助研发的 TSV 电迁移寿命评价系统,通过开展双通孔 TSV 样品电迁移加速寿命试验,分析了 TSV 在不同电应力(1×10^5 、 5×10^5 和 1×10^6 A/cm²)和温度应力(25℃、50℃和 75℃)条件下的特征失效特性。实验结果表明,相同温度下,电流越大 TSV 样品失效越快,在 25℃下电流密度为 1×10^5 A/cm² 时的样品失效时间约为 56.2 h,而 1×10^6 A/cm² 时仅为 10.5 h;电流相同时,温度越高 TSV 样品失效越快,温度从 25℃升高到 75℃时,样品失效时间减少了约 64.9%。基于 TSV 样品失效时间得到其特征失效时间,并通过设计算法得到 TSV 电迁移 Black 寿命模型及其参数, $E_a = 0.672$ 、 $n = 0.665\ 825$ 、 $A = 6.089\ 99 \times 10^{-130}$ 。

关键词: LabVIEW;硅通孔;电迁移;寿命评价;特征失效

中图分类号: TN40 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of evaluation system for electromigration lifetime of
through-silicon viaZhang Liting¹ Gong Tao^{1,2} Chen Si² Zhou Bin² Lu Xiangjun¹(1. School of Material Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 351024, China;
2. Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, The Fifth
Electronics Research Institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China)

Abstract: The evaluation of electromigration lifetime of through-silicon via in 3D packaging often requires multiple equipment and instruments to cope with different test requirements, which not only increases the complexity, but also may introduce uncertainties. The LabVIEW was conducted as the upper computer, the programmable controller and industrial personal computer were used as the core control unit, and the lifetime evaluation system of TSV electromigration was developed by combining the precision power supply, high-precision multimeter, relay array, and sample connecting terminal, so as to ensure the accurate acquisition and monitoring of the key parameters. With the aid of the developed evaluation system for electromigration lifetime of TSV, the characteristic failure properties of TSV were analyzed under different electrical stresses (1×10^5 、 5×10^5 and 1×10^6 A/cm²) and temperature stresses (25℃、50℃ and 75℃) by carrying out the accelerated electromigration lifetime tests on dual-via TSV samples. The experimental results show that at the same temperature, the higher the current, the faster the TSV samples fail. The failure time of the samples at the current density of 1×10^5 A/cm² at 25℃ is about 56.2 h, while it is only 10.5 h at 1×10^6 A/cm². When the current is the same, the higher the temperature, the faster the TSV samples fail, and the failure time decreases as the temperature is increased from 25℃ to 75℃ by about 64.9%. The characteristic failure time of the TSV samples is obtained based on their failure time, and the Black lifetime model of TSV electromigration and its parameters are obtained through design algorithms, with $E_a = 0.672$, $n = 0.665\ 825$, and $A = 6.089\ 99 \times 10^{-130}$.

Keywords: LabVIEW;through-silicon via;electromigration;lifetime evaluation;feature failure

0 引 言

随着 3D 集成电路技术的飞速进步,硅通孔(through-

silicon via, TSV)已成为实现高效芯片垂直互连的核心,其可靠性直接影响着 3D 集成系统的整体性能与长期稳定性^[1-3]。关于 TSV 电应力可靠性的研究一般集中在电迁

移、电阻变化和疲劳、绝缘层介质击穿等方面。TSV 电迁移是指在电应力作用下导致填充金属内部电流密度的非均匀分布,这可能在局部区域引起过热,并触发电化学反应,进而使填充金属中产生空洞和晶格位错,损害 TSV 导电性和 3D 集成电路整体可靠性^[4-5]。TSV 的电迁移现象受到多种因素的影响,包括但不限于电流密度大小、金属材料性质以及温度等。高电流密度和高温会加剧金属的电子迁移现象,不同金属材料的电迁移效应也不一致^[6-7]。此外,TSV 的尺寸、形状和布局,TSV 的制备工艺参数(如电镀条件和退火温度)对电迁移效应的产生同样具有重要影响。

目前国内外研究者主要通过试验测试、Black 模型修正以及多物理场模拟来进行 TSV 电迁移寿命预测的研究。在试验研究方面,通过搭建电迁移试验平台和可靠性分析方法进行 TSV 的失效机理分析、寿命预测及器件结构与材料优化^[8]。倪浩^[9]对多重应力耦合下 TSV 可靠性及寿命预测进行了研究,分析了电迁移、热应力和随机振动 3 种载荷对 TSV 可靠性的影响,并采用理论计算与数值模拟相结合的方式来评估多应力条件下 TSV 可靠性和疲劳寿命。然而,这项研究主要依赖于理论和模拟结果,缺乏具体数据来验证模拟结果的准确性和有效性。张继成^[10]通过改变电流密度和温度条件,对 TSV 进行多组电迁移试验,利用直流电源提供稳定电流,数据采集系统实时监测试验参数,Zeiss Sigma 场发射扫描电镜进行微观分析,全面研究 TSV 的电迁移失效规律。但由于数据采集频率有限,无法实时监测失效过程。Safonov 等^[11]使用带有加热台的 EM 6030A 探针和 Agilent 4156C 半导体分析仪组成的试验平台开展恒温加速 TSV 电迁移测试。上述试验系统虽然能有效模拟不同工作环境,确保测试的准确性和适用性,然而其高昂成本和对操作人员的专业要求限制了其广泛应用。同时上述试验系统往往需要借助多种设备和仪器,以应对不同试验需求,这不仅增加了试验的复杂性,还可能引入不确定性因素,影响试验结果的准确性和可重复性。

作为评估 TSV 电迁移的经典模型,Black 方程表明 TSV 平均失效时间与电流密度、环境温度及激活能有直接的关系。然而,TSV 服役过程中平均失效时间与很多因素有关,如机械力、热、电、磁场的影响,特别是由此引发的应力演变也是 TSV 失效模式的主导因素。因此需综合考虑电迁移在 TSV 失效中的影响因素,修正 TSV 的 Black 模型,使其更能精确的预测 TSV 的失效时间。张伊铭^[12]采用了有限元法仿真分析来预测 TSV 的电迁移寿命,评估不同应力和温度条件下的电迁移失效时间,提出了一个修正的电迁移寿命预测模型,这个模型考虑了热应力和电迁移的耦合效应,适应性更强。但是该模型还需要进行大量试验确定模型准确性。Fan 等^[13]通过试验和数值模拟相结合研究不同温度和电流密度下的电迁移失效机理,揭示了电流密度、温度、应力等多因素的耦合作用对 TSV-Cu 电迁移的影响。然后提出了一种改进的 Black 模型,专门针对小

尺寸 TSV-Cu 中的电迁移行为,提升了对电迁移失效时间的预测精度。但是改进的 Black 模型虽然提高了预测的精度,但也带来了更高的计算复杂度,数值模拟过程变得更加耗时且计算资源需求大。因此,为满足 TSV 电迁移试验的需求,全面记录 TSV 的电流-电压-电阻特性,本文报道了一种高效的 TSV 电迁移寿命评价系统,其能够实时监测 TSV 电迁移过程中的关键参数,如电流、温度等,并且通过引入寿命模型程序算法,根据记录的试验数据改进和完善 TSV 电迁移 Black 寿命模型,使试验系统不仅能进行电迁移试验,还具备自动测算 TSV 寿命模型参数的能力。

1 硬件设计

1.1 系统总体结构设计

TSV 电迁移寿命评价系统硬件结构如图 1(a)所示,其由研祥 IPC-310 型工控机(上位机)、Panasonic 公司的 FP-XHC38AT 型可编程逻辑控制器(programmable logic controller,PLC)、宏发公司的 FP-X E14YR 型继电器阵列、Keysight 公司的 B2901B 型精密电源、HIOKI 公司的 DM7275 型高精度直流电压计和 TSV 样品连接端组成。样机设计图如图 1(b),高度 1 600 mm,宽度 600 mm,深度 800 mm。由上往下布局依次为显示器(计算机界面)、键盘抽屉、工控机、精度电源和直流电压计,PLC 和继电器阵列安装在机箱内部。上位机通过 RS232 通信总线与精密电源、PLC 和直流电压计连接,并通过 LabVIEW 软件配置上述设备的串口通信,实现功能控制。PLC 作为主控单元,根据指令通过继电器阵列控制 TSV 样品连接端(16 个样品工位)电流通路的开关状态。直流电压计用于测量 TSV

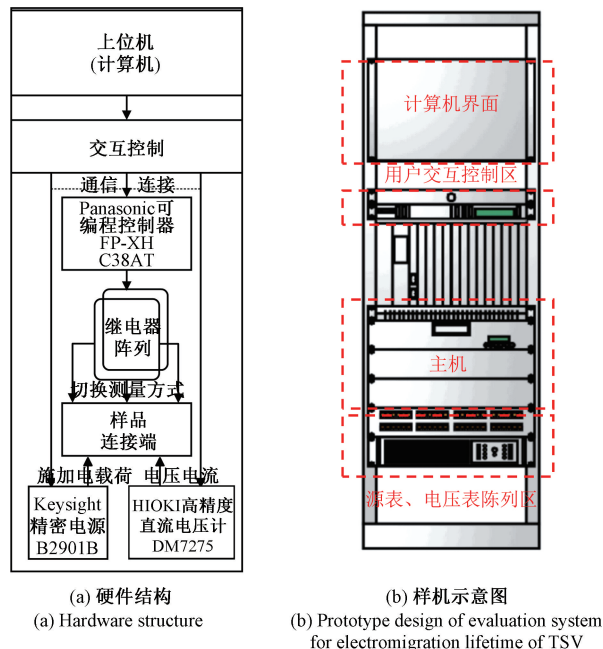


图 1 TSV 电迁移寿命评价系统

Fig. 1 Schematic diagram

样品的电压变化,并实时将数据反馈至 PLC。PLC 以高效的算法分析测量数据,判断是否达到设定条件,进而控制继电器阵列的开关状态。循环流程不断进行,实现对 TSV 样品电流-电压特性的精准调控与全面监测。最终,实时更新的数据传至上位机,以提供详实的试验数据,为深入分析和研究 TSV 电迁移提供可靠基础。

1.2 继电器阵列和样品连接端工作原理电路

PLC、样品连接端(样品工位)和直流电压计之间的工作原理图如图 2 所示。样品连接端通过继电器与直流电压计、PLC 相连接,负责接入和管理 16 个样品工位。PLC 根据预设的测试流程和程序,依次控制继电器的通断状态,使得直流电压计可以按照设定的时间间隔对每个工位的电压进行测量。为了满足 16 个工位能够施加电压和电

流载荷,同时考虑到精密电源表的功率有限,所以样品连接端设计了串联和并联两种连接方式。图 3(a)中 16 个工位与精密电源表组成并联回路。在精密电源表的功率一定下,16 个工位样品可满足在同一个电压下的恒压电应力试验。每个工位串联一个取样电阻(取样电阻远小于样品电阻),PLC 控制继电器阵列可以将每个取样电阻与电压计形成独立的回路,从而可以任意得到每个工位的电流数据变化情况。图 3(b)中精密电源表和工位形成串联回路,16 个工位的电流相同。同样 PLC 控制继电器阵列可以将直流电压计接入到每个工位的两端,直流电压计按照工位顺序依次巡检,从而得到每个工位的电压变化情况。串联模式提供了 TSV 电迁移可靠性试验的批量测试方式。

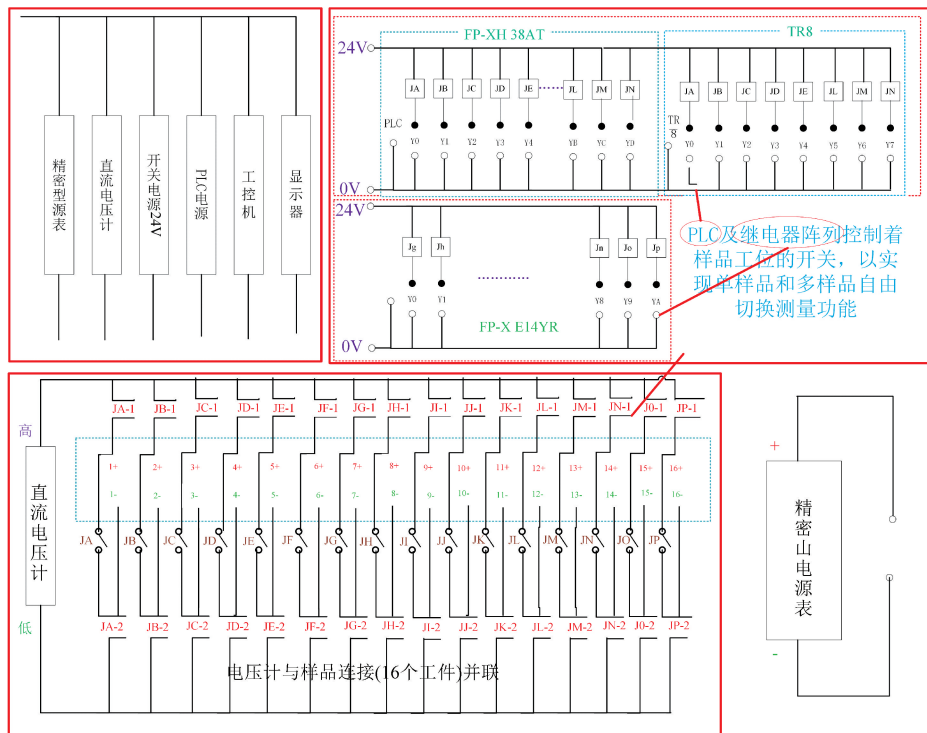


图 2 PLC、样品连接端和直流电压计之间工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram between PLC, sample connection terminal and DC voltmeter

2 软件设计

2.1 软件总体设计

根据 TSV 电迁移的试验需求、试验流程和参数控制,通过 LabVIEW 设计了一套用户友好和功能强大的软件^[14-15],其包括用户交互界面、数据采集模块和寿命计算模块等(如图 4)。用户交互界面如图 5 所示。在菜单栏中有启动、停止试验、清零计时、参数设置、设置电阻、查看数据和数据分析等功能。通讯栏显示试验过程老化时间、试验批号、源表电压电流以及通讯状态,使用户能够实时监测系统状态。核心部分的工位样品状态栏,采用表格形式呈现,通过清晰的表头,用户可以准确理解各列的含义。

16 行分别对应 16 个工位,显示时间日期以及工位的电压、电流和失效时间。数据采集模块实现了对 TSV 电迁移过程中关键数据的实时采集和记录。若样品数据达到设定值则记录和存贮,并退出试验;若没达到试验前设定值,则数据采集模块持续记录样品数据变化直至达到设定值。寿命计算模块的任务是基于试验数据,应用特定的寿命参数计算算法,对 TSV 寿命进行定量评估。

2.2 寿命模型参数计算

寿命模型参数计算界面设计了多个 TSV 可靠性寿命模型的参数拟合算法。在寿命计算模块的整个流程中,拟合寿命公式是重要一环,精准评估 TSV 寿命。基于 TSV 电迁移寿命经典模型 Black 方程的拟合流程如图 6。系统

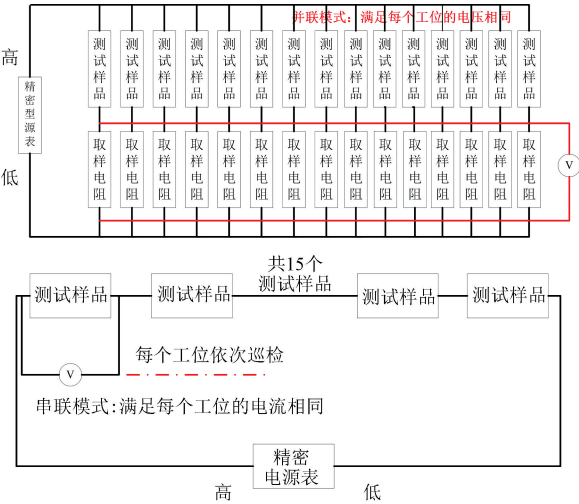


图 3 16 个工位的并联和串联连接端原理图

Fig. 3 Schematic diagram of 16 stations in parallel and in series connecting terminals

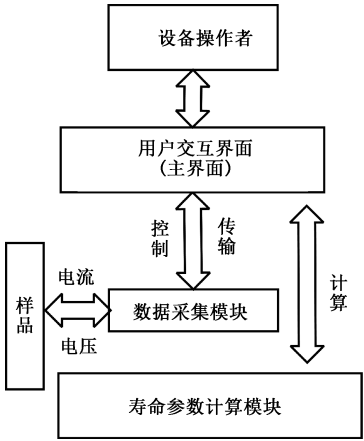


图 4 软件总体结构图

Fig. 4 General structure of the software

通过算法将记录的 TSV 样品失效时间转换为特征失效时间,并通过调用数据库将 TSV 样品的特征失效时间、电流



图 5 用户交互界面

Fig. 5 User interaction interface

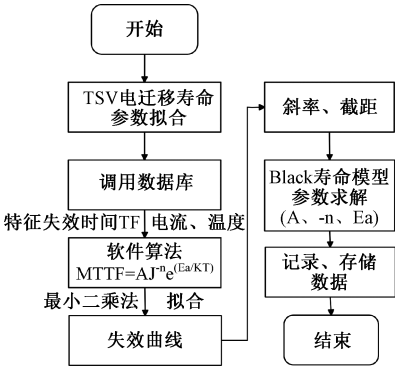


图 6 TSV 电迁移 Black 寿命模型拟合流程

Fig. 6 Fitting process of Black lifetime model for TSV electromigration

和温度等参数导入到 TSV 电迁移 Black 寿命模型之中。运用最小二乘法获取 TSV 电迁移试验中失效曲线的斜率

和截距,以拟合 Black 寿命模型参数,从而建立专属属于该 TSV 的 Black 寿命模型,以表征 TSV 样品在电迁移过程中的寿命特性。

特征失效时间是 TSV 电迁移试验中的关键参数,直接影响到失效曲线的形状和斜率,是拟合 TSV 电迁移 Black 寿命模型的核心步骤。图 7 为转换算法的程序框图,其由数据预处理、数据拟合和参数计算阶段组成。在数据预处理阶段,导入系统记录的试验数据文件 A,通过索引数组将 A 文件夹中的数据索引到 for 循环中计算,直至文件夹 A 中数据全部处理完毕。在数据拟合阶段,通过“创建数组”、“数组转置”和“文件夹存入与读取”虚拟仪器,将处理完毕后的文件夹 A 存入新的文件夹 B,然后读取文件夹 B 进行线性拟合。将拟合曲线的斜率和截距捆绑做成波形图,同时将斜率和截距通过参数计算阶段的公式计算虚拟仪器,得出该批样品的特征失效时间。

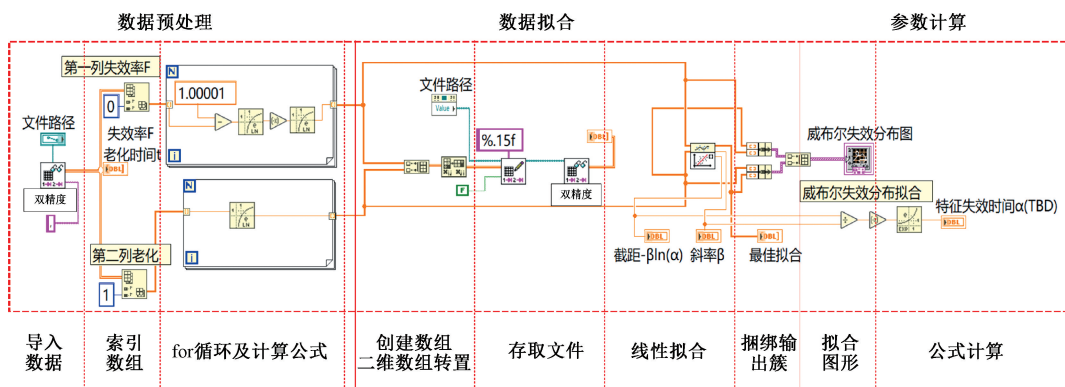


图 7 失效时间转换为特征失效时间的算法程序框图

Fig. 7 Algorithm flowchart for converting failure time to characteristic failure time

2.3 LabVIEW 与 PLC 的通信和控制程序

为了实现对 TSV 电迁移寿命试验的自动化控制,采用 LabVIEW 作为上位机,并通过 RS232 串口与 PLC 建立通信。LabVIEW 与 PLC 的串口配置如图 8。首先引入“VISA 配置串口”虚拟仪器,接着完成“VISA 资源名称”、“波特率”、“奇偶性”和“数据比特”等配置,然后引入到

PLC,最后通过“VISA 关闭”虚拟仪器完成 LabVIEW 与 PLC 的串口通信。图 9 为向 PLC 发出参数指令的程序,是图 8 的嵌套子程序。该程序有“控制器发送参数”、“控制器发送线圈”、“控制器读取状态”和“控制器读取寄存器数据”等子虚拟仪器,它与上述图 8 的程序共同实现了 LabVIEW 与 PLC 的通信与控制。

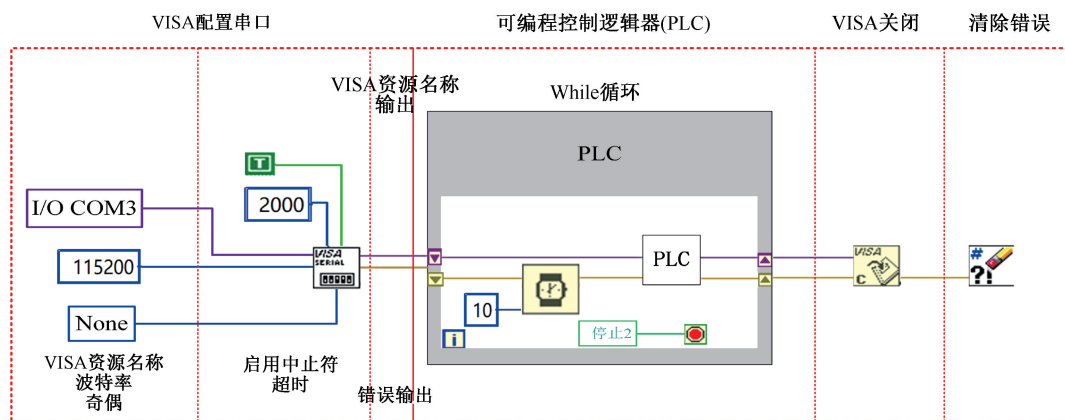


图 8 LabVIEW 软件与 PLC 之间的 VISA 串口通信连接

Fig. 8 Serial communication connection of VISA between LabVIEW software and PLC

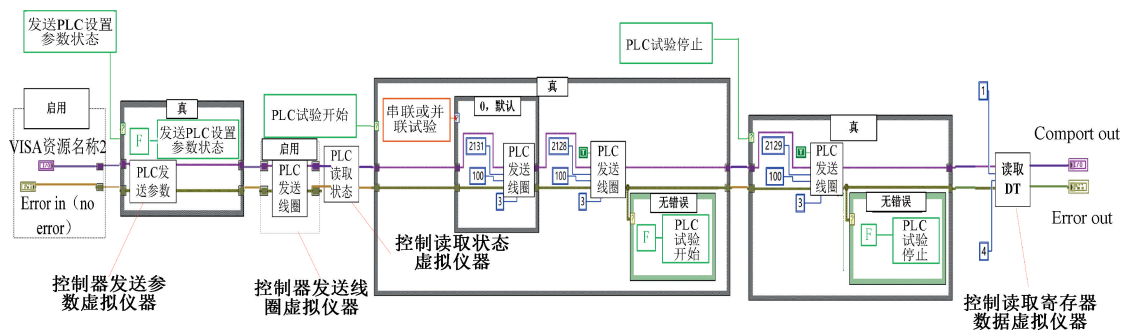


图 9 向 PLC 发出的参数指令程序图

Fig. 9 Programming diagram of parameter commands issued to the PLC

3 TSV 电迁移寿命评价试验

3.1 试验样品和条件

TSV 试验样品的截面如图 10 所示。该截面从顶部到底部依次包括顶部聚酰亚胺 (polyimide, PI) 胶、顶部重布线层 (redistribution layer, RDL)、SiO₂ 层、TSV 与 Si 层、底部 PI 胶-1 与底部 PI 胶-2、底部 RDL 以及凸点。TSV 样品由华进半导体封装先导技术研发公司完成,高度 100 μm、直径 20 μm,其显微镜下微观形貌如图 11 所示,分别为 TSV 阵列排布,TSV-凸点结构正面和反面。TSV 电迁移可靠性试验平台如图 12 所示,其由研发的 TSV 电迁移寿命评价系统和南京芯测公司的 8 英寸高低温探针台 (GP200-SE) 组成。在此探针台上配备的 Micropositioner GP40 探针用于试验微操作。采用恒定电流应力对 TSV 样品进行电迁移加速寿命试验,试验条件如表 1。当通过 TSV 的电流密度超过 10⁵ A/cm² 时,焦耳效应产生的热量显著增多,导致热迁移和应力迁移现象增强,TSV 的电迁移效应显著增强^[16-17],因此电流密度分别控制在 1×10⁵、5×10⁵ 和 1×10⁶ A/cm² 进行 TSV 电迁移加速寿命试验。TSV 样品分为 5 组,每组 3 个样品,其中 1#、2# 和 3# 组为电流应力试验组 (温度为 25℃)。为了研究温度对电迁移的影响,在电流密度为 5×10⁵ A/cm² 条件下,使 2#、4# 和 5# 样品从室温 25℃ 倍增到 75℃。

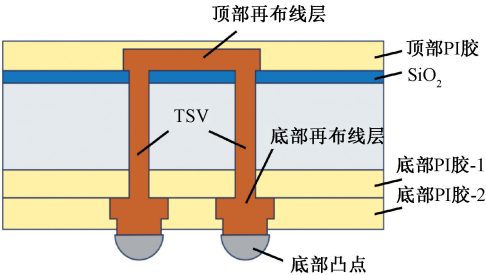


图 10 TSV 截面图
Fig. 10 Cross-section of TSV

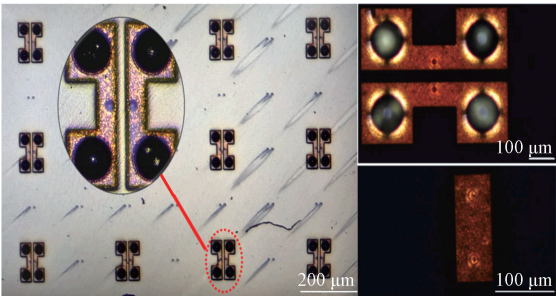


图 11 TSV 微观形貌:TSV 阵列,TSV-凸点结构的正面和反面
Fig. 11 Microscopic morphology of TSV: TSV array, front side and reverse side of TSV-bump structure



图 12 TSV 电迁移可靠性试验平台
Fig. 12 Electromigration reliability test platform of TSV

表 1 TSV 电迁移加速寿命试验条件
Table 1 Accelerated life test conditions of TSV electromigration

组别	电流/A	电流密度/(A·cm ⁻²)	温度/℃
1#	1.59	1×10 ⁶	25
2#	0.785	5×10 ⁵	25
3#	0.159	1×10 ⁵	25
4#	0.785	5×10 ⁵	50
5#	0.785	5×10 ⁵	75

3.2 试验结果与分析

TSV 电迁移寿命评价系统记录了 5 个试验组电迁移试验过程中相应的电压-时间 (V-t) 曲线变化。图 13~17 为 1#~5# 试验组每组 3 个样品的 V-t 曲线图。由图可知,在电迁移过程中大部分 TSV 样品的 V-t 曲线展现出一系列特征变化规律:初始阶段是稳定的线性或近似线性行为,中间阶段是波动或者剧烈的非线性行为,最后是电压迅速上升以及最终的失效。反应了 TSV 样品电阻从初始稳定,到发生电迁移造成电阻变化,最后电迁移引起样品结构变化,在内部形成孔洞,导致样品内部断裂或者导通。

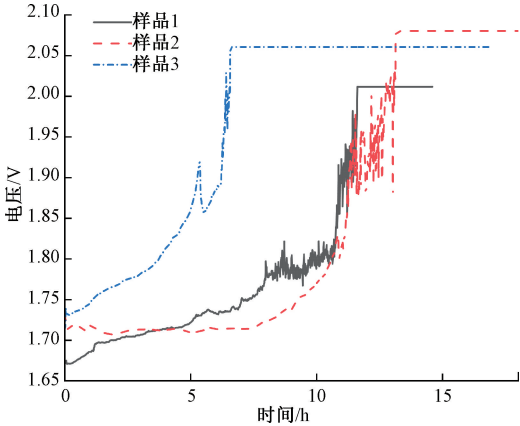


图 13 试验组 1# (1.59 A、25℃) 的 V-t 曲线图
Fig. 13 V-t curves for test group 1# (1.59 A, 25℃)

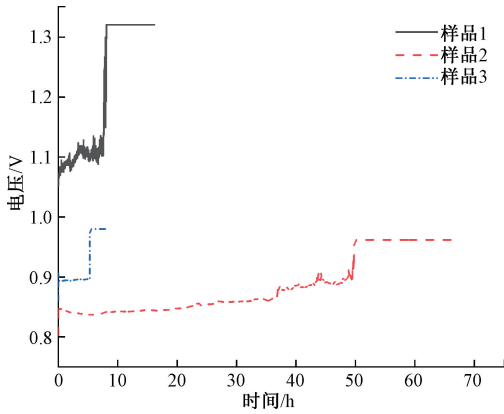


图 14 试验组 2# (0.785 A, 25°C) 的 V-t 曲线图
Fig. 14 V-t curves for test group 2# (0.785 A, 25°C)

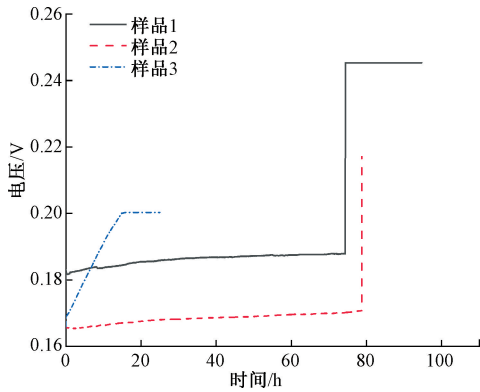


图 15 试验组 3# (0.159 A, 25°C) 的 V-t 曲线图
Fig. 15 V-t curves for test group 3# (0.159 A, 25°C)

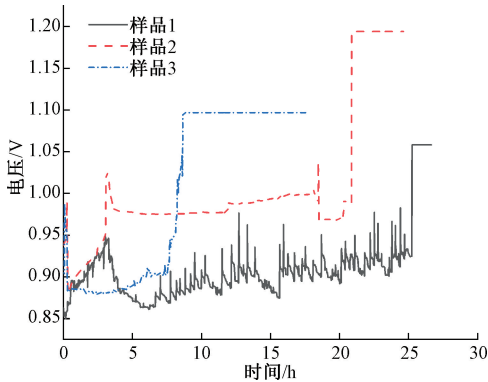


图 16 试验组 4# (0.785 A, 50°C) 的 V-t 曲线图
Fig. 16 V-t curves for test group 4# (0.785 A, 50°C)

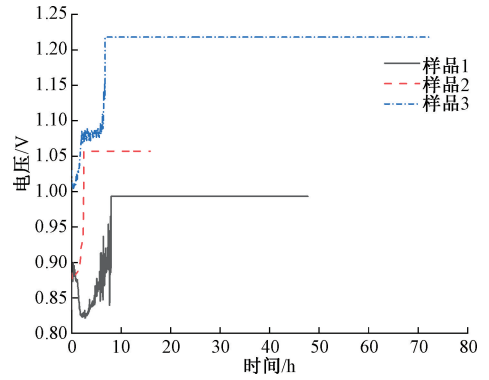


图 17 试验组 5# (0.785 A, 75°C) 的 V-t 曲线图
Fig. 17 V-t curves for test group 5# (0.785 A, 75°C)

过程工艺影响,电迁移特性存在差异。

进行 TSV 电迁移可靠性寿命试验后,为建立 TSV 电迁移 Black 寿命模型,需要对 TSV 电迁移寿命试验的数据进行处理,转化为失效时间概率密度分布函数,随后计算特定应力水平下的特征失效时间。然后利用特征失效时间和应力水平组成的曲线计算出 TSV 电迁移 Black 寿命方程的参数,以建立 TSV 电迁移可靠性寿命模型。威布尔分布的累积分布函数可以更好地描述 TSV 电迁移试验过程中的失效时间特征,同时考虑了时间的非线性增长和失效概率的变化^[18-21]。将威布尔分布的累积分布函数变换成式(1),其中 $\text{Ln}[-\text{Ln}(1-F)]$ 与 $\text{Ln}(t)$ 符合线性关系,其中 F 为累积失效率, t 为失效时间, β 为斜率, $-\beta \text{Ln}(\alpha)$ 为截距。1#~5#组基于 TSV 电迁移寿命试验的失效时间和失效率的威布尔分布数据如表 2。

$$\text{Ln}[-\text{Ln}(1-F)] = \beta \left[\text{Ln}\left(\frac{t}{\alpha}\right) \right] \quad (1)$$

根据表 2 的威布尔分布数据表,及样品失效时间与特征失效时间的关系,依据图 7 所示的算法程序框图,将 5 个试验组的失效时间数据转换为特征失效时间,结果如表 3 所示。在 TSV 电迁移过程中,电应力和温度应力均对其有影响。在相同温度下,如试验组 1#、2#、3#,电流越大对样品内部产生的破坏越大,失效时间越快。在电流相同时,如试验组 2#、4#、5#,温度越高样品失效的越快。根据系统算法得到 TSV 电迁移 black 寿命模型参数: $E_a = 0.672$, $n = 0.665825$, $A = 6.08999 \times 10^{-130}$, 因此本试验样品的 TSV 电迁移 Black 寿命模型如式(2)所示。

$$MTTF = 6.08999^{-130} \cdot J^{-0.665825} e^{\left(\frac{0.672}{K_B T}\right)} \quad (2)$$

TSV 样品的失效时间差异较大,这可能是由于 TSV 制备

表 2 威布尔分布数据表

Table 2 Data table of Weibull distribution

实验组别	失效时间 t/s	失效个数	累计失效个数	累计失效率 F	$Ln[-Ln(1-F)]$	Ln/t
1 #	41 885	1	1	0.33	-0.915 1	10.642 7
	47 398	1	2	0.66	0.075 8	10.766 3
	23 695	1	3	1	2.443 4	10.073 0
2 #	29 221	1	1	0.33	-0.915 1	10.282 6
	179 688	1	2	0.66	0.075 8	12.099 0
	19 232	1	3	1	2.443 4	9.864 3
3 #	268 412	1	1	0.33	-0.915 1	12.500 3
	284 367	1	2	0.66	0.075 8	12.558 0
	54 066	1	3	1	2.443 4	10.898 0
4 #	75 308	1	1	0.33	-0.915 1	11.229 3
	31 144	1	2	0.66	0.075 8	10.346 4
	91 109	1	3	1	2.443 4	11.419 8
5 #	28 857	1	1	0.33	-0.915 1	10.270 1
	8 817	1	2	0.66	0.075 8	9.084 4
	41 885	1	1	0.33	-0.915 1	10.642 7

表 3 5 组 TSV 样品的平均特征失效时间

Table 3 Mean characteristic failure time for 5 groups of samples

试验组	1 #	2 #	3 #	4 #	5 #
特征失效 时间/s	41 304	117 417	218 202	37 878	2 616

4 结 论

搭建了能够同时测试多个样品的 TSV 电迁移寿命高效评价系统。采用高精度直流电压计和精密电源对 TSV 电迁移过程中电压与电流等关键参数进行准确采集和控制;通过通讯总线 RS232 实现了 LabVIEW 与 PLC、直流电压计和精密电源的通信连接,实现了上位机对多台硬件设备的监测和调控。基于研发的 TSV 电迁移寿命评价系统,开展了双通孔 TSV 电迁移寿命试验,采用威布尔分布的累积分布函数得到了 TSV 样品在不同电应力和温度应力条件下的特征失效时间。利用系统的寿命算法拟合出了模型参数,得出了试验样品的 TSV 电迁移 Black 寿命模型。

参考文献

[1] XIONG W, DONG G, WANG Y, et al. 3-D compact marchand balun design based on through-silicon via technology for monolithic and 3-D integration[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2022, 30(8): 1107-1118.

[2] LAU J H. Recent advances and trends in multiple

system and heterogeneous integration with TSV interposers[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022, 12(8): 1271-1281.

[3] 王力, 刘学朋, 张亦弛. 基于 BCL-ASA-BP 神经网络的模拟电路板芯片故障诊断[J]. 电子测量技术, 2022, 45(14): 164-171.

WANG L, LIU X P, ZHANG Y CH. Fault diagnosis of analog circuit board chip based on BCL-ASA-BP neural network [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(14): 164-171.

[4] ZHANG P, XUE S B, WANG J H. New challenges of miniaturization of electronic devices: Electromigration and thermomigration in lead-free solder joints [J]. Materials & Design, 2020, 192: 108726.

[5] TAE-KYU L, HANRY Y, INDRANATH D. Damage mechanisms in through-silicon vias due to thermal exposure and electromigration[J]. Journal of Electronic Materials, 2024, 53(3): 1214-1222.

[6] DONG C C, HUANG P ZH. Phase-field simulation of conductive inclusion evolution in highly symmetric oriented single crystal metal interconnects under anisotropic interface diffusion induced by electromigration[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2024, 19(3): 373-395.

[7] SHAN Y P, HAO H J, YIN Y ZH, et al. Effects of temperature and dc electric fields on perfluorooctanoic acid sorption kinetics to activated carbon [J].

- Environmental Science Technology, 2024, 16(4): 123-147.
- [8] ZHANG SH Y, JING X Y, HE P, et al. Grain orientation and prediction of thermal shock fatigue of Sn-3Ag-0.5 Cu solder joints for fan-out wafer level packaging [C]. 2023 IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference, United States, 2023: 2113-2119.
- [9] 倪浩. 多应力耦合下 TSV 结构的可靠性仿真和寿命预计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- NI H. Reliability simulation and life prediction of TSV structures under multi-stress coupling [D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [10] 张继成. 电迁移失效的微观机理及寿命预测方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- ZHANG J CH. Study on microscopic mechanism of electromigration failure and lifetime prediction method[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- [11] SAFONOV S O, BESPALOV V P, GOLISHNIKOV A, et al. Estimating the reliability of aluminum metallization of integrated circuits by accelerated electromigration testing at constant temperature[J]. Russian Microelectronics, 2015, 44: 453-459.
- [12] 张伊铭. 多场耦合下三维封装互连可靠性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- ZHANG Y M. Reliability study of 3D packaging interconnects under multi-field coupling [D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [13] FAN Z W, LIU Y, CHEN X, et al. Research on fatigue of TSV-Cu under thermal and vibration coupled load based on numerical analysis[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 106: 113590-113591.
- [14] 黄彬, 张春, 王乐平. 基于 LabVIEW 的座椅耐久性可视化测试系统研发[J]. 电子测量技术, 2022, 45(10): 33-38.
- HUANG B, ZHANG CH, WANG L P. The study of visual test system for seats based on LabVIEW[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(10): 33-38.
- [15] 杨柯, 陈则王, 赵晓兵, 等. 基于 LabVIEW 的蓄电池测试实验平台设计与实现[J]. 电子测量技术, 2019, 42(6): 72-76.
- YANG K, CHEN Z W, ZHAO X B, et al. Design and implementation of battery test experiment platform based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(6): 72-76.
- [16] ZHANG Y M, TIAN W CH, WANG H Y, et al. Electrothermal reliability analysis of electromigration in 3-D TSV-RDL interconnects [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(1): 157-165.
- [17] TSAI Y CH, LEE CH H, CHANG H CH, et al. Electrical characteristics and reliability of wafer-on-wafer(WOW) bumpless through-silicon via[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 16(7): 3520-3525.
- [18] PANDA A, MAITI S, PALODHI K, et al. Effect of modified double-sided grating structures on efficiency enhancement of thin-film silicon solar cells [J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9532-9539.
- [19] DEBDATTA P. The distribution of commodity futures: A test of the generalized hyperbolic process[J]. Applied Economics, 2024, 56(15): 1763-1783.
- [20] OKOTH S, FREDRICK O, MOTOCHI I. Investigation of wind characteristics and estimation of wind power potential of narok county using weibull distribution [J]. Journal of Energy Research and Reviews, 2023, 15(2): 35-46.
- [21] MONTHIRA D, RATEEYA S, ANDREI V. Bayesian estimation and prediction for discrete Weibull distribution[J]. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2024, 44(11): 4693-4703.

作者简介

张立廷, 硕士研究生, 主要研究方向为集成电路三维封装可靠性及失效分析。

E-mail: zlttan90@163.com

龚涛, 硕士研究生, 主要研究方向为集成电路可靠性及失效分析。

E-mail: gongtao20210911@163.com

陈思, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为集成电路可靠性及评价方法。

E-mail: chensiceprei@yeah.net

周斌, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为集成电路封装可靠性。

E-mail: zhoubin@ceprei.com

卢向军(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为集成电路可靠性及失效分析。

E-mail: luxiangjun0531@163.com