

键合丝最小直流熔断电流的建模与分析

曹小鸽^a, 张艳肖^a, 杨 杨^b

(西安交通大学城市学院 电气与信息工程系^a 物理教学部^b, 西安 710018)

摘 要: 半导体产品的高可靠性要求作为内部引线的键合丝有足够大的电流承载能力。本文建立了键合丝最小直流熔断电流的理论模型和公式, 用 COMSOL Multiphysics 有限元软件建立键合丝的电热耦合仿真模型, 并与理论模型进行了对比。结果表明, 键合丝工作时中间温度最高, 两端温度最低, 温度分布沿轴向及径向均呈抛物线状分布。金、铜和银三种键合丝的熔断电流仿真值与实验值符合得较好, 理论值比实验值偏小, 但其乘以相应系数后可接近于实际工况。该理论仿真模型可为键合丝熔断电流的分析提供参考。

关键词: 金属材料; 半导体封装; 键合丝; 熔断电流; 有限元

中图分类号: TG146, TG422.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)04-0006-08

Modeling and analysis of minimum DC fusing current of bonding wire

CAO Xiao-ge^a, ZHANG Yan-xiao^a, YANG Yang^b

(Department of Electrical and Information Engineering^a, Department of Physics^b,
Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, China)

Abstract: A large enough current carrying capacity of the bonding wire as the internal lead is required for the high reliability of semiconductor products. The theoretical model and formula of minimum DC fusing current of the bonding wire were established in this paper. The electric-thermal coupling simulation model was obtained by using the finite element software COMSOL Multiphysics, and then compared with the theoretical model. The results show that the temperature of the bonding wire is the highest in the middle and the lowest at both ends, and the axial and radial temperature distribution are both parabolic. The simulation values are in good agreement with the experimental values for gold, copper, and silver bonding wires, but the theoretical values are smaller, which can be calibrated by introducing the corresponding coefficients. The theory and simulation model may be used as a theoretical reference for the fusing current analysis of the bonding wire.

Key words: metallic material; semiconductor package; bonding wire; fusing current; finite element

近年来微电子产业及光纤通信产业发展迅速, 键合丝作为微电子半导体封装及光纤通信用半导体器件封装的重要材料之一, 用于芯片内部引线及芯片与外管脚的电气连接^[1-4]。半导体封装要求键合丝要有高的可靠性^[5-7]。针对键合丝的化学稳定性已经有一些文献做了研究^[8-10]。对键合丝的熔断电流方

面的研究, 曹军^[11]给出 20.32 μm 直径的高纯铜线和微合金铜线的熔断电流分别与时间及弧长的实验关系曲线, 以及根据实验结果拟合出微合金铜线的熔断电流分别与时间及弧长的函数关系。范红等^[12]给出不同直径下 KT6 型银合金丝熔断电流随着长度变化的实验曲线。黎学文等^[13]给出 25 μm 线径 3 mm

收稿日期: 2022-02-17

基金项目: 陕西省“十三五”教育科学规划 2020 年度课题(SGH20Y1380); 陕西省“十四五”教育科学规划 2022 年度课题(SGH22Y1722); 西安交通大学城市学院校内科研基金项目(2020Y14)

第一作者: 曹小鸽, 女, 硕士, 讲师。研究方向: 半导体激光器的封装工艺。E-mail: 328025777@qq.com

长的键合金丝、金合金丝和银合金丝的实验熔断电流值。伍艺龙等^[14]对小线径键合金丝熔断电流进行了测试。Heraeu 公司给出 10 mm 长键合铜、金和铝丝随直径变化的实验熔断电流值和直径 25 μm 的键合铜、金和铝丝随长度变化的实验熔断电流值^[15]。对于键合丝熔断电流理论计算方面, Raytheon 公司给出 10 mm 长度的铜丝、金丝和铝硅丝的熔断电流与引线直径的线性关系的经验公式^[6], 但未说明具体环境对熔断电流值的影响。

本文首先在考虑键合丝工作环境的基础上进一步对其熔断电流做理论分析并建立键合丝最小直流熔断电流的理论计算模型。其次用 COMSOL Multiphysics 有限元软件建立键合丝直流工作时的电热耦合模型。最后用建立的理论及仿真模型分析不同直径及不同长度下的金、铜、银键合丝的最小直流熔断电流值。

1 理论模型的建立及计算公式的推导

1.1 键合丝最小直流熔断电流的稳态热传递模型

熔丝的电流越大熔断时间越短, 电流越小熔断时间越长, 当电流小到一定值时其熔断时间为无穷长, 即不能熔断, 这个电流被称为最小熔断电流, 额定工作电流必须小于最小熔断电流^[16]。影响键合丝最小熔断电流值的因素有很多, 如: 丝材质、丝长、丝横截面积、环境温度、热对流和热辐射的参数等^[3]。图 1 表示长 l 的键合丝在最小直流熔断电流时的热传递及温度分布示意图。

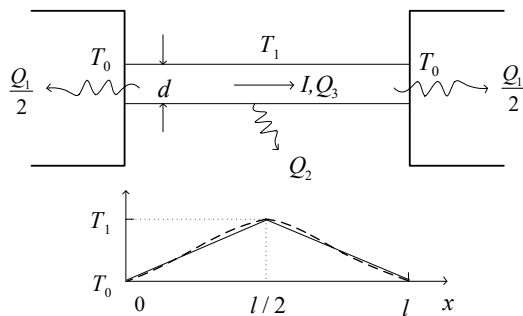


图 1 键合丝最小直流熔断电流的稳态热传递及温度分布示意图

Fig.1 Diagram of the steady-state heat transfer and temperature distribution of minimum DC fusing current of bonding wire

图 1 中, d 为键合丝的直径, T_0 为外界环境温度, 室温时为 293K, T_1 为金属的熔点。单位时间内通过丝两端热传导出外的热量为 Q_1 , 单位时间内

通过丝表面积向空气对流传导的热量 Q_2 , 电源在单位时间内通过电流 I 向键合丝提供的热量为 Q_3 。键合丝通过表面积热辐射的热量太小^[3], 理论建模时忽略不计。当 $d \ll l$ 时, 可认为温度 T 是位置坐标 x 的函数, 温度分布只随键合丝轴向变化, 并不随径向变化, 即同一 x 位置处温度相同。整根丝中间温度最高, 为 T_1 , 两端温度最低, 为 T_0 , 并且温度分布呈抛物线状对称分布^[17], 如图 1 中虚线所示。为了模型简化采用温度分布随轴线线性变化^[18], 如图 1 中穿过虚线的实线所示。

1.2 键合丝最小直流熔断电流的求解

根据傅里叶热传导定律^[19]:

$$Q = -kA_1 \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中 k 为键合丝的热导率, A_1 为丝的横截面积, 即 $\pi d^2/4$, 负号表示热量总是从高温部分向低温部分传导。键合丝的温度随轴向 x 线性变化, 则温度梯度:

$$\nabla T = \frac{dT}{dx} = \frac{T_1 - T_0}{0.5l} \quad (2)$$

∇T 对于材料及长度确定的任一键合丝可视为常数。考虑金属热导率随温度变化, 由文献[20]给出的金属热导率随温度变化的实验数据可绘制出金属热导率和温度的关系图, 如图 2 所示。

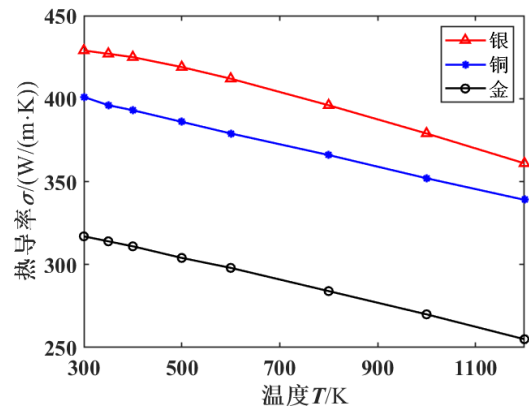


图 2 几种金属热导率随温度变化关系图

Fig.2 Temperature dependence of the thermal conductivity of several metals

从图 2 可见, 金、银和铜这几种金属的热导率从室温 T_0 到熔点 T_1 几乎随温度呈线性变化。再由文献[21]给出金属的热导率的一些实验数据, 可得这三种金属的热导率 k 从室温 T_0 到熔点 T_1 近似满足以下关系:

$$k = k_0 + \frac{k_1 - k_0}{T_1 - T_0} (T - T_0) \quad (3)$$

式中 k_0 为金属室温热导率, k_1 为金属熔点热导率。结合公式(1)至公式(3)可求出单位时间内通过丝两端热传出去的热量:

$$Q_1 = \frac{\pi d^2 (T_1 - T_0)(k_1 + k_0)}{2l} \quad (4)$$

由公式(2), 可得轴线任一 x 处的温度 T 满足:

$$T = T_0 + \nabla T x = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{0.5l} x \quad (5)$$

再根据热对流公式^[19]:

$$Q = \alpha A_2 (T - T_0) \quad (6)$$

式中 α 为空气对流系数, A_2 为物体与空气接触的表面积。可求得在单位时间内键合丝通过表面向空气传出去的热量:

$$Q_2 = \frac{\alpha \pi d (T_1 - T_0) l}{2} \quad (7)$$

一般金属电导率 σ 与温度 T 存在如下关系:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0 [1 + \beta(T - T_0)]} \quad (8)$$

式中 ρ_0 为室温 293 K 时金属的电阻率, β 为金属的温度系数。可求得 l 长度的键合丝电阻:

$$R = \frac{4\rho_0 l}{\pi d^2} \left[1 + \frac{\beta(T_1 - T_0)}{2} \right] \quad (9)$$

单位时间内电源通过电流 I 向键合丝提供的热量为:

$$Q_3 = I^2 R = \frac{4\rho_0 l I^2}{\pi d^2} \left[1 + \frac{\beta(T_1 - T_0)}{2} \right] \quad (10)$$

根据能量守恒定律, 键合丝应满足:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (11)$$

将公式(4)、(7)及公式(10)代入公式(11), 可得熔断电流:

$$I = \frac{\pi d^2}{2l} \sqrt{\frac{(T_1 - T_0)}{\rho_0 [\beta(T_1 - T_0) + 2]}} \times \sqrt{\frac{\alpha l^2}{d} + k_1 + k_0} \quad (12)$$

公式(12)即为所建立的考虑环境影响时的键合丝最小直流熔断电流的理论计算公式。当键合丝的材料特性参数、尺寸、对流系数确定后, 即可利用公式(12)计算出键合丝室温下的最小直流熔断电流值。如果外界环境温度不为室温, 将公式(12)中的 T_0 改为相应环境温度值, 相应的 k_0 和 ρ_0 改为该温度对应的热导率和电阻率后可计算其最小直流熔断电流值。并且从公式(12)还可以看出在材料及环境不变时, 熔断电流值随着直径的增大而增大, 随着长度的增大而减小。也应注意此公式应用有几个前提: 1) 忽略键合丝热辐射的热量。2) $d \ll l$, 温度 T 不沿径向变化, 只沿轴向线性变化。3) 金属的热导率从室温 T_0 到熔点 T_1 随温度线性变化。

表 1 为三种键合丝的物理参数值。

表 1 三种键合丝的物理参数值

Table 1 Parameters of several types of metals

材料	室温电阻率 ρ_0 / ($10^{-8} \Omega \cdot m$)	电阻温度 系数 $\beta/(1/K)$	室温热导率 k_0 / (W/(m·K))	熔点热导率 k_1 / (W/(m·K))	熔点/K	材料表面 辐射率
铜	1.678	0.00393	401	330	1356	0.05
金	2.40	0.00324	317	247	1337	0.02
银	1.586	0.0038	429	363	1235	0.02

但公式(12)还稍显复杂, 为计算方便, 再给出几种特殊情况下最小熔断电流的简易计算公式。

1.3 键合丝最小直流熔断电流简易计算公式

1.3.1 工作环境密闭而导致对流系数 α 几乎为零时

当对流系数 α 几乎为零, 即 Q_2 忽略不计。只考虑键合丝从两端热传出去的热量 Q_1 时:

$$I = \frac{\pi d^2}{2l} \sqrt{\frac{(T_1 - T_0)(k_1 + k_0)}{\rho_0 [\beta(T_1 - T_0) + 2]}} = \mu_1 \frac{d^2}{l} \quad (13)$$

其中 $\mu_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(T_1 - T_0)(k_1 + k_0)}{\rho_0 [\beta(T_1 - T_0) + 2]}}$, 是只跟金属材料有关的系数, 当材料确定后, μ_1 为常数。

1.3.2 短丝、长丝最小直流熔断电流的计算

当键合丝产生的热量主要通过丝两端热传递出去时, 即 $Q_1 \gg Q_2$ 时, 丝材为短丝; 当键合丝产生的热量主要通过表面积热传递出去时, 即 $Q_1 \ll Q_2$ 时, 丝材为长丝。当 $Q_1 = Q_2$ 时, 根据公式(5)和公式

(6)可求出长短丝临界长度 $l_{\text{临}} = \sqrt{\frac{d(k_1 + k_0)}{\alpha}}$ 。短丝

时, Q_2 可忽略, 熔断电流:

$$I_1 = \frac{\pi d^2}{2l} \sqrt{\frac{(T_1 - T_0)(k_1 + k_0)}{\rho_0 [\beta(T_1 - T_0) + 2]}} = \mu_1 \frac{d^2}{l} \quad (14)$$

其结果与当对流系数 α 忽略不计时相同, μ_1 可称之为短丝系数。长丝时, Q_1 可忽略, 熔断电流:

$$I_2 = \frac{\pi d^{\frac{3}{2}}}{2} \sqrt{\frac{\alpha(T_1 - T_0)}{\rho_0 [\beta(T_1 - T_0) + 2]}} = \mu_2 d^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

其中 $\mu_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\alpha(T_1 - T_0)}{\rho_0 [\beta(T_1 - T_0) + 2]}}$, μ_2 称之为长丝系

数。当材料确定后, μ_2 为对流系数 α 的函数, α 越大, μ_2 越大, 熔断电流 I_2 的值越大。

表2给出部分键合铜丝的 $l_{\text{临}}$, μ_1 和 μ_2 的值。

表2 键合铜丝的长短丝系数及不同直径下的临界长度

Tab.2 Long-wire and short-wire coefficients of the bonding copper wire and the critical length for different diameters

对流系数 $\alpha / (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$	短丝系数 $\mu_1 / (\text{A}/\text{m})$	长丝系数 $\mu_2 / (\text{A}/\text{m}^{3/2})$	$l_{\text{临}} / \text{mm}$			
			($\Phi 20 \mu\text{m}$)	($\Phi 30 \mu\text{m}$)	($\Phi 50 \mu\text{m}$)	($\Phi 75 \mu\text{m}$)
10	5.225×10^6	5.030×10^5	38.2	46.8	60.5	74.0
30	5.225×10^6	8.713×10^5	22.1	27.0	34.9	42.7
50	5.225×10^6	1.125×10^6	17.1	20.9	27.0	33.1

从表2可看出, 短丝系数 μ_1 跟材料有关系, 材料确定为铜后, μ_1 的值不变。当材料确定后, μ_2 是对流系数 α 的函数, 随着 α 值增大而增大。对流系数不变时, 临界长度 $l_{\text{临}}$ 随着直径增大而增大; 键合丝直径不变时, 临界长度 $l_{\text{临}}$ 随着对流系数 α 值的增大而减小。

1.4 几种熔断电流计算公式对比

铜丝直径 $25 \mu\text{m}$ 、对流系数 α 为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 计算出 $\mu_1 = 5.225 \times 10^6 \text{ A}/\text{m}$, $\mu_2 = 1.125 \times 10^6 \text{ A}/\text{m}^{3/2}$, 进而根据公式(12)、(14)及(15)可计算出 I 、 I_1 和 I_2 , 三者的关系如图3所示。

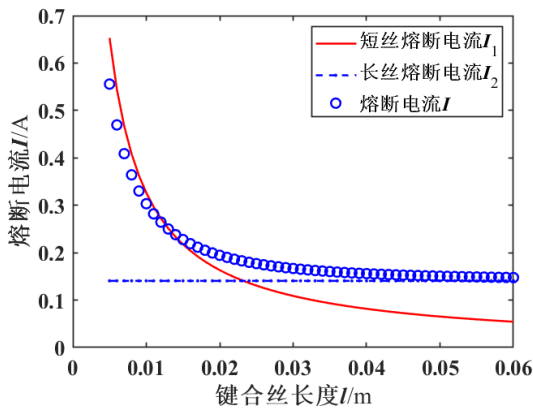


图3 长短丝熔断电流公式与总熔断公式对比

Fig.3 Comparison of the short-wire, long-wire and the total fusing current formula

从图3中可明显看出, 在丝较短的情况下短丝公式(14)与最小直流熔断电流 I 符合得比较好, 在丝较长的情况下长丝公式(15)与 I 符合得比较好。故在判断键合丝为长丝或短丝后, 可以用长丝或短丝公式简易计算键合丝最小直流熔断电流值。

2 仿真模型的建立及与理论计算模型对比分析

2.1 键合丝直流电热耦合仿真模型的建立与分析

使用多物理场有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立在一定环境下键合丝的直流电热耦合模型。键合丝设置为具有一定尺寸的长直圆柱体, 材料可按照表1的值设置, 外界环境温度及键合丝两端的温度可设置为室温 293 K , 设置对流系数及材料表面辐射率后, 再通有电流激励后可仿真出键合丝的温度场分布。仿真模型可以改变键合丝的直径、长度以及键合丝的材料, 也可以改变外界环境温度及空气对流系数等, 这样可以仿真出考虑外界环境时不同材料及不同尺寸的键合丝熔断电流值及其温度场分布。

图4为金丝在 2 mm 长、直径为 $25 \mu\text{m}$ 及对流系数 α 为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时的室温下通一直流电流 I 为 1.3362 A 的温度分布图。从图4可以看到, 金丝中间的温度达到熔点 1337 K , 该电流值即为此键合丝在该环境下的最小直流熔断电流值。图5为其沿轴向的仿真温度值及其数据拟合曲线与理论采用线性温度分布的对比图。拟合曲线呈抛物线状分布, 拟合公式为:

$$T = -1.0643 \times 10^3 x^2 + 2.1292 \times 10^3 x + 233.4588 \quad (16)$$

同时可计算出仿真得到的键合丝的温度平均值比按照线性化处理的键合丝的温度平均值高 112.8 K 。图6为该金丝在 0.5 mm 处的径向温度分布图, 也呈抛物线状分布, 但径向温差仅为 0.001 K , 故理论分析时若 $d \ll l$, 径向温差的影响可忽略不计。当

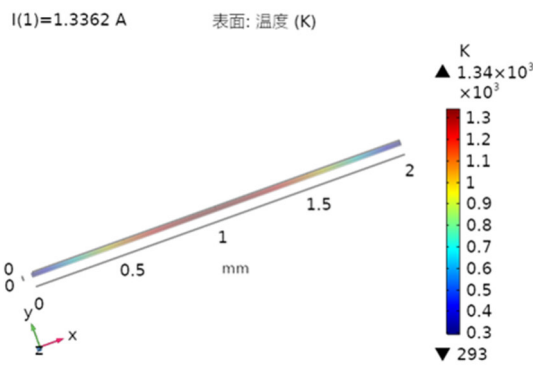


图 4 金丝($\Phi 25 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$)的温度分布仿真图

Fig.4 Simulation diagram of the temperature distribution of gold wire ($\Phi 25 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$)

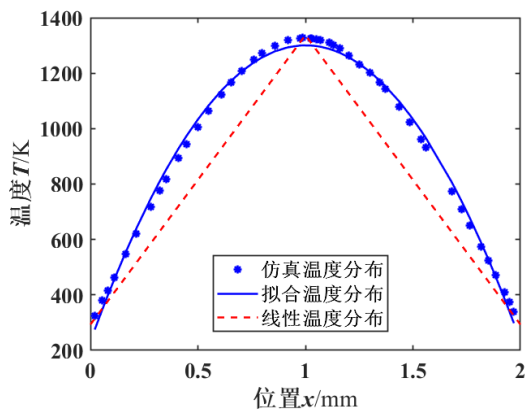


图 5 金丝($\Phi 25 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$)轴向温度分布对比

Fig.5 Axial temperature distribution of gold wire ($\Phi 25 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$)

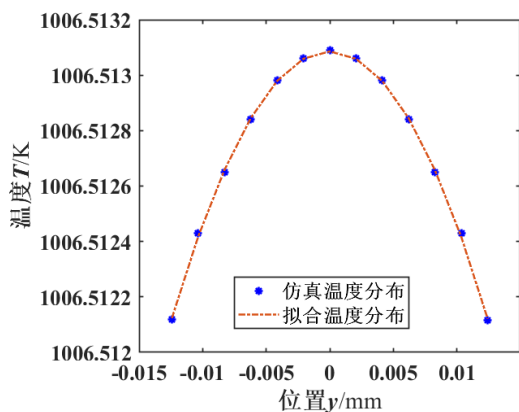


图 6 金丝($\Phi 25 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$)径向温度分布

Fig.6 Radial temperature distribution of gold wire ($\Phi 25 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$)

仿真不设置表面辐射后, 仿真得到的最小直流熔断电流值为 1.3358 A, 与考虑表面辐射后的电流仿真值 1.3362 A 相对误差为 0.03%, 故理论分析时材料表面辐射的影响也可忽略不计。利用理论公式(12)计算出该键合丝的最小直流熔断电流为 1.055 A, 比仿真得到的电流值小, 仿真值是理论值的 1.27 倍。综合以上分析, 存在误差的主要原因是理论分析时温度的轴向分布按照线性化处理所造成。当金键合丝长度为 5 mm 时, 理论计算的最小直流熔断电流值为 0.4374 A, 仿真值为 0.54 A, 仿真值是理论值的 1.23 倍。

若假设外界环境温度及键合丝两端的温度升高至 353 K, 即 60℃时, 仿真出来的最小直流熔断电流为 1.306 A。升高至 373 K, 即 100℃时, 仿真值为 1.276 A。可见最小直流熔断电流值随着外界环境温度的升高而降低。

2.2 最小直流熔断电流理论值与仿真值及实验值对比

2.2.1 金丝最小直流熔断电流对比分析

以下分析均采用外界环境温度为室温 293 K, 对流系数为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。图 7 是利用公式(12)计算出的键合金丝的熔断电流的理论值与软件仿真出的熔断电流对比图。从图 7 中可以看到, 金丝直径为 20、30 及 $38 \mu\text{m}$, 长度从 0.5 mm 到 20 mm 时, 两者趋势符合较好, 理论计算值略低于仿真值。图 8 为金丝最小直流熔断电流理论值、仿真值及实验值对比图。从图 8 中可以看出金丝直径在 $25 \mu\text{m}$ 及 $50 \mu\text{m}$ 处, 软件仿真出的熔断电流值与 Heraeu 公司所给出的熔断电流实验值^[15]符合很好。这两者的熔断电流值比理论计算出的熔断电流值都稍大一些, 主要原因是理论分析时将轴向温度分布采用线性化处理所导致。图 7 和图 8 中的仿真值是理论计算值的 1.15~1.27 倍, 并且该系数是随着键合丝直径的增大而增大。因此, 用理论公式(12)计算出的熔断电流值乘以系数 1.15~1.27 可接近仿真值, 也更接近实际的工况。

从图 7、图 8 中可以看出, 在其他参数不变的情况下, 熔断电流随着金丝长度的增加而减小, 随着直径的增大而增大。直径 $25 \mu\text{m}$ 金丝在室温下理论计算的最小直流熔断电流随着对流系数的变化规律如图 9 所示, 丝较短时对流系数影响不大, 而在丝变长之后对流系数逐渐对熔断电流产生影响。同一长度时, 对流系数越大熔断电流越大。

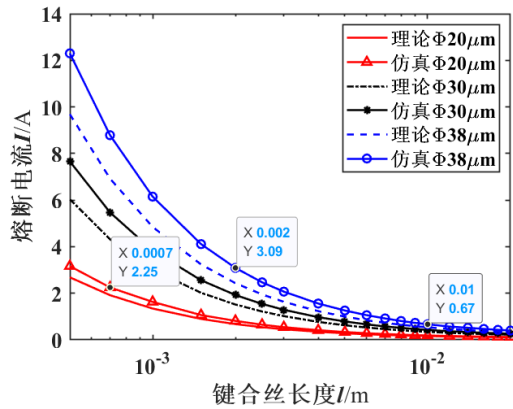


图7 金丝最小直流熔断电流理论值与仿真值对比

Fig.7 Comparison of theoretical values and simulation values of the minimum DC fusing current of gold wires

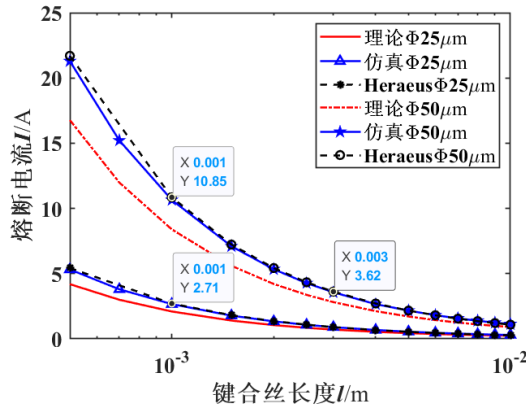


图8 金丝最小直流熔断电流理论值、仿真值及实验值对比

Fig.8 Comparison of theoretical values, simulation values and experimental values of the minimum DC fusing current of gold wires

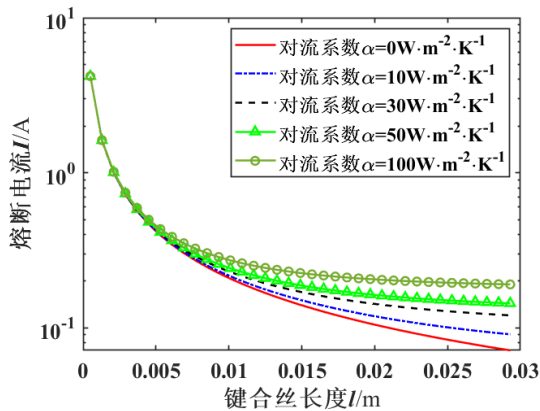


图9 金丝熔断电流随对流系数变化图

Fig.9 Diagram of the minimum DC fusing current of gold wire for different convection coefficients

2.2.2 铜丝及银丝最小直流熔断电流对比分析

图10为利用公式(12)计算出的键合铜丝和键合银丝的熔断电流值与仿真值的对比图,图11为铜丝最小直流熔断电流理论值、仿真值及实验值对比图。

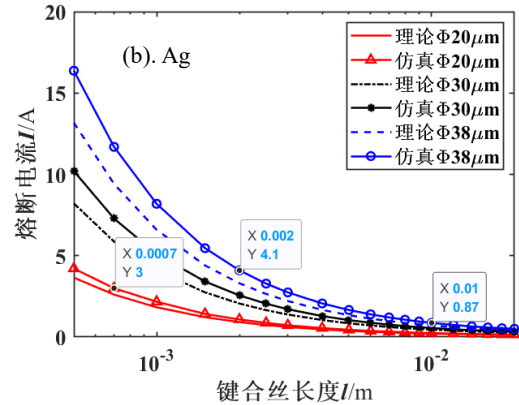
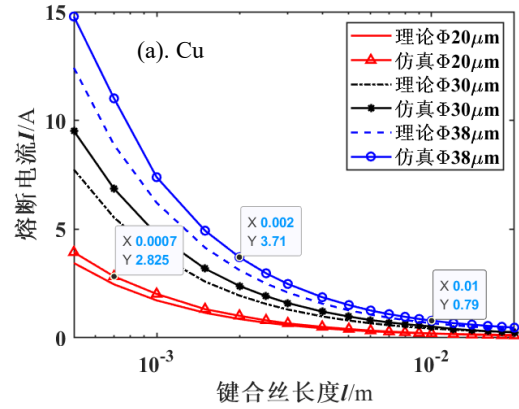


图10 铜丝和银丝最小直流熔断电流理论值与仿真值对比

Fig.10 Comparison of theoretical values and simulation values of the minimum DC fusing current of copper (a) and silver wires (b)

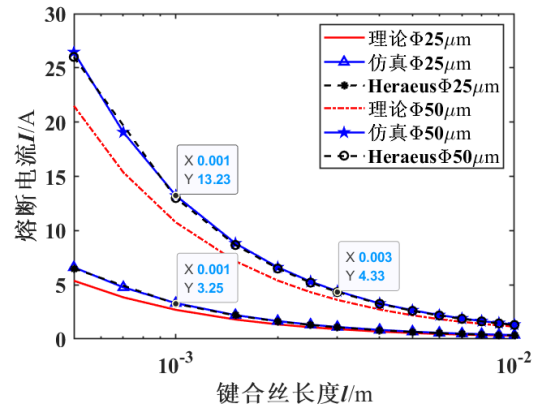


图11 铜丝最小直流熔断电流理论值、仿真值及实验值对比

Fig.11 Comparison of theoretical values, simulation values and experimental values of the minimum DC fusing current of copper wires

从图 10 可以看到,铜丝或银丝直径为 20、30、38 μm ,长度从 0.5 mm 到 20 mm 时,两者趋势符合得也较好,理论计算值也略低于仿真值。从图 11 中可以看出直径 25 μm 铜丝在 50 μm 处,软件仿真熔断电流值与 Heraeu 公司^[15]所给出的熔断电流实验值也符合得也很好。这两者的熔断电流值也比理论计算出的熔断电流值都稍大一些,原因与金丝情况相同。图 10(a)和图 11 中铜丝熔断电流仿真值是理论计算值的 1.03~1.24 倍,图 10(b)中银丝熔断电流仿真值是理论计算值的 1.11~1.243 倍。从图 10、图 11 可以看出,当其他参数不变时,熔断电流值也随着长度的增加而减小,随着直径的增大而增大,该结果与键合金丝的结果一致。

2.2.3 三种键合丝的熔断特性对比分析

图 12 为三种金属键合丝在直径为 25 μm 时的最小直流熔断电流仿真值随长度变化对比图。显而易见,银的导电导热性最好,相同条件下,银的熔断电流最大,其次为铜,最后为金。

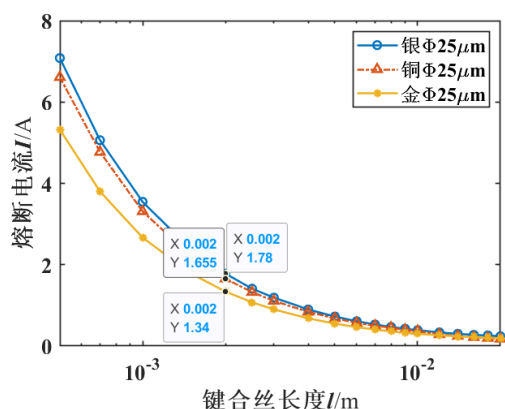


图 12 金、银和铜三种键合丝最小直流熔断电流对比图

Fig.12 Comparison of the minimum DC fusing current of gold, silver and copper bonding wires

3 结论

1) 当键合丝的材料特性参数、尺寸、环境温度及对流系数确定后,可利用公式(12)计算出键合丝在室温下的最小直流熔断电流值。在判断其为长丝或短丝后,可利用简易计算公式来计算熔断电流。

2) 仿真分析得出,键合丝中心温度最高,两端温度最低,并且沿轴向、径向的温度呈抛物线状分布。在对金、铜和银丝熔断电流分析后,发现仿真值与实验值符合得更好,而理论值相对较小的原因是分析时将沿轴向的温度分布线性化处理所导

致。理论值乘以相应系数后可接近实验值。

3) 在其他参数均固定不变的情况下,键合丝熔断电流随着长度的增加而减小,随着直径的增大而增大。三种键合丝对比分析发现银的熔断电流最大,其次为铜和金。

参考文献:

- [1] 田春霞. 电子封装用导电丝材料及发展[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 782-787.
TIAN C X. Materials of conducting silks and their development using in electronics packaging[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 782-787.
- [2] 陈永泰, 谢明, 王松, 等. 贵金属键合丝材料的研究进展[J]. 贵金属, 2014, 35(3): 66-70.
CHEN Y T, XIE M, WANG S, et al. Research progress on the precious metal bonding wire materials[J]. Precious Metals, 2014, 35(3): 66-70.
- [3] 曹小鸽, 徐微. 大电流键合金丝熔断能力模拟分析[J]. 电子与封装, 2017, 17(8): 1-4.
CAO X G, XU W. Simulation analysis of fusing capacity of high current bonding gold wire[J]. Electronics & Packaging, 2017, 17(8): 1-4.
- [4] 郝海英, 张巧霞, 熊晓东, 等. 新型贵金属材料在 5G 时代的研究现状及应用展望[J]. 贵金属, 2020, 41(S1): 68-72.
HAO H Y, ZHANG Q X, XIONG X D, et al. Research status and application prospect of new precious metal materials in 5G technologies' next evolution of mobile communication[J]. Precious Metals, 2020, 41(S1): 68-72.
- [5] 王彩媛, 孙荣禄. 芯片封装中铜丝键合技术的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(S1): 206-209.
WANG C Y, SUN R L. Research progress in copper wire bonding technology for chip packaging[J]. Materials Reports, 2009, 23(S1): 206-209.
- [6] 汪洋, 赵振力, 莫德锋, 等. 红外探测器组件封装中的引线特性研究[J]. 红外, 2018, 39(2): 8-13.
WANG Y, ZHAO Z L, MO D F, et al. Research on characteristics of wires for infrared detector packaging[J]. Infrared, 2018, 39(2): 8-13.
- [7] 宋婧, 麻翠. 半导体桥点火器芯片引线键合技术研究[J]. 火工品, 2021(3): 8-11.
SONG J, MA C. Study on chip lead bonding technology of semiconductor bridge igniter[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(3): 8-11.

- [8] LIU H, CHEN Q, ZHAO Z Q, et al. Reliability of Au-Ag alloy wire bonding [C]//Proceedings, Electronic Components and Technology Conference, IEEE, Las Vegas, 2010: 234-239.
- [9] 林良, 臧晓丹. 封装用抗腐蚀高可靠性银合金丝[J]. 电子与封装, 2014, 14(3): 9-13.
- LIN L, ZANG X D. Introduction of a corrosion-resistant high reliability silver alloy bonding wire in package[J]. Electronics & packaging, 2014, 14(3): 9-13.
- [10] 曹军, 范俊玲, 尚显光, 等. 高温高湿环境对键合 Cu 线可靠性影响的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 86-91.
- CAO J, FAN J L, SHANG X G, et al. Bond reliability under high temperature and humid environment for copper bonding wire[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 86-91.
- [11] 曹军. 键合铜线性能及键合性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012: 81-85.
- CAO J. Research of copper bonding wire performance and bonding performance[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012: 81-85.
- [12] 范红, 马晓霞, 刘希云, 等. 键合银合金丝的制备[J]. 黄金, 2017, 38(1): 6-9.
- FAN H, MA X X, LIU X Y, et al. Preparation of Ag alloy bonding wire[J]. Gold, 2017, 38(1): 6-9.
- [13] 黎学文, 蔡济隆, 陈磊, 等. LED 封装用键合丝的性能分析对比[J]. 中国照明电器, 2019(9): 18-22.
- LI X W, CAI J L, CHEN L, et al. Analysis and comparison of performance of bonding wire in LED packaging[J]. China Light & Lighting, 2019(9): 18-22.
- [14] 伍艺龙, 罗建强, 丁义超, 等. 小线径键合金丝熔断电流测试与分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(5): 430-433.
- WU Y L, LUO J Q, DING Y C, et al. Test and analysis of the DC fusing current of small gold wire[J]. Journal of CAEIT, 2021, 16(5): 430-433.
- [15] Heraeus. Bonding wires for semiconductor technology [EB/OL]. https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/bonding_wires_documents/Brochure_Bonding_Wire.pdf. 2022.
- [16] 郭丙君. 电气控制技术[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2018: 20-21.
- GUO B J. Electrical control technology[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2018: 20-21.
- [17] 王季梅. 低压熔断器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979: 99.
- WANG J M. Low-voltage fuse[M]. Beijing: China Machine Press, 1979: 99.
- [18] 王明灼, 王永华, 周玉刚. 金属丝熔断特性的研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2008(5): 12-15.
- WANG M Z, WANG Y H, ZHOU Y G. On Property of fusing of metal wire[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2008(5): 12-15.
- [19] LIENHARD J H IV, LIENHARD J H V. A heat transfer textbook [M]. Massachusetts USA: Phlogiston Press Cambridge, 2005: 10-20.
- [20] EFUNDA A. Element list by name[EB/OL]. https://www.efunda.com/materials/materials_home/materials.cfm.2022.
- [21] MILLS K C, MONAGHAN B J, KEENE B J. Thermal conductivities of molten metals: Part 1 pure metals[J]. International Materials Reviews, 1996, 41(6): 209-242.

【上接第5页】

- [10] 徐国富. 稀土在贵金属铂及其合金中的作用和应用[J]. 稀有金属与硬质合金, 1993(4): 54-59.
- XU G F. The function and application of rare earth to platinum and its alloys[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 1993(4): 54-59.
- [11] 胡昌义, 魏燕, 袁晓虹, 等. 贵金属高温结构材料的强化及应用[J]. 贵金属, 2021, 42(1): 70-78.
- HU C Y, WEI Y, YUAN X H, et al. Strengthening mechanism and application of platinum group metals high temperature structural materials[J]. Precious Metals, 2021, 42(1): 70-78.
- [12] 吴保安, 李凤, 唐会毅, 等. 弥散强化对 PtRh10 高温力学性能及微观形貌的影响[J]. 功能材料, 2021, 52(5): 16-19.
- WU B A, LI F, TANG H Y, et al. The influence of dispersion strength on the high temperature mechanical properties and microstructure of PtRh10 alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(5): 16-19.