

多芯片组件(MCM)用金锡焊带材料电阻率及热导率温度特性研究

赵 炜¹ 李 岩¹ 张 磊¹ 彭 博² 王志强³

(1 中国空间技术研究院,北京 100010)

(2 战略支援部队航天系统部装备部项目管理中心,北京 101318)

(3 北京跟踪与通讯技术研究所,北京 100094)

文 摘 对牌号为 Au₈₀Sn₂₀ 的金锡焊带材料在 208~423 K 的电阻率及热导率与温度的函数关系进行了研究,并对其在多芯片组件(MCM)中的传热效果进行了评估。分别对材料在 208~423 K 中 5 个温度点的电阻率及 4 个温度点的热导率进行了测试,基于理论模型建立电阻率/热导率随温度变化的函数关系,最终采用模拟热扩散数值方法评估材料在高温下的传热能力。结果表明,采用修正函数模型后,金锡焊带材料在 208~423 K 下热导率与电阻率的关系符合测试结果,随芯片表面温度的边界条件从 208 K 升高至 423 K,采用变温热导率模型得到的热流密度模拟计算结果相比理想化恒定热导率模型的差异性逐渐升高至 5.5%。综上,金锡焊带材料热导率与电阻率的关系符合 Wiedemann-Franz 法则修正后的 Smith-Palmer 方程,在该材料传热设计时应考虑其热导率温度效应。

关键词 金锡焊带材料,模拟热扩散数值方法,Wiedemann-Franz 法则,Smith-Palmer 方程

中图分类号: TG111.4

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.005

Study on Temperature Characteristics of Resistivity and Thermal Conductivity of Gold Tin Solder Strip Used in MCM

ZHAO Wei¹ LI Yan¹ ZHANG Lei¹ PENG Bo² WANG Zhiqiang³

(1 China Academy of space technology, Beijing 100010)

(2 Project Management Center of Equipment Department and Space System Department of Strategic Support Force, Beijing 101318)

(3 Beijing Insitute of Tracking and Telecommunicaitons Technology, Beijing 100094)

Abstract The functional relationship between resistivity and thermal conductivity and temperature of gold tin solder strip material with the brand of Au₈₀Sn₂₀ were studied in the temperature range of 208–423 K, and its heat transfer effect in MCM module was evaluated. The resistivity at five temperature points and thermal conductivity at four temperature points of the material in 208 K to 423 K were tested, respectively. Based on the theoretical model, the functional relationship between the resistivity and thermal conductivity with temperature was established. Finally, the heat transfer ability of the material at high temperature was evaluated by using the numerical method of simulated thermal diffusion. The results show that the relationship between the thermal conductivity and the resistivity of the solder strip material at 208 K to 423 K is consistent with the test results after using the modified function model. As the boundary condition of the chip surface temperature increases from 208 ~ 423 K, the difference between the simulation results of the heat flux density obtained by using the variable temperature thermal conductivity model and the idealized constant thermal conductivity model gradually increases to 5.5%, To sum up, the relationship between thermal conductivity and resistivity of gold solder strip material conforms to the Smith-Palmer equation modified by Wiedemann-Franz law, and the temperature effect of thermal conductivity should be considered in the heat transfer design of the material.

Key words Gold tin solder strip material, Simulated thermal diffusion numerical method, Wiedemann Franz

收稿日期: 2023-02-10

第一作者简介: 赵炜, 1993 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事航天器用材料质量保证和传热数值仿真研究工作。E-mail: 1793787476@qq.com

0 引言

由80%Au及20%Sn共晶形成的金锡合金钎焊材料已用于半导体及其他行业多年,其具有钎焊温度适中,高强度、焊接时无需助焊剂、低黏滞性等焊接工艺优势,此外还具有较高的热导率、电导率,良好的抗蠕变性及耐腐蚀性等优异的物理性质,基于以上优势,金锡合金已广泛应用于气密封装、光电子封装领域并逐渐成为用于光电器件封装最好的一种材料^[1]。

此外,金锡焊料也应用于高功率激光二极管的管芯焊接^[2]。激光二极管的发光性能随温度的升高而急剧降低,金锡焊料的热导率高于铅锡焊料且明显高于其他无铅焊料,可将激光二极管的发热量有效散入基体。

基于金锡焊料较高的热导率,除上述应用外,其具有一种新型使用途径,即将金锡焊带作为芯片模块中芯片的散热通道,在航天器中的一种典型应用场景是用于多芯片组件(MCM)模块内部,铜的焊接性较差,若将散热铜带直接焊接到高功率芯片金属载体表面,其焊接难度高,易出现焊不透的情况,此外焊接过程易产生较大的焊接变形,造成焊点附近产生裂纹,焊接不牢固。基于金锡焊带较高的热导率与优异的焊接性可使其作为通道使高功率芯片的热量通过金属载体传递到散热铜管上,以达到有效散热的目的,使用实物如图1所示。

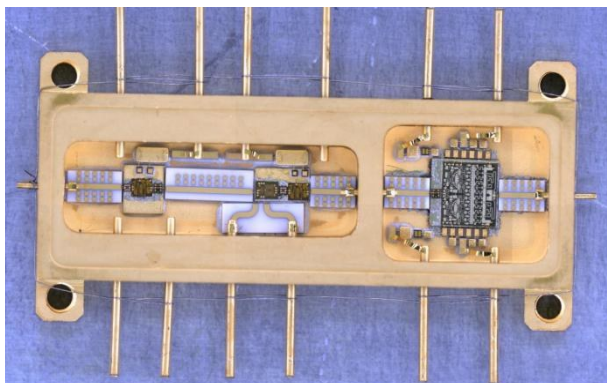


图1 金锡焊带材料在MCM组件中散热的使用情况

Fig. 1 Application of gold tin solder strip material for heat dissipation in MCM components

目前,尚无对上述新型应用背景下金锡焊带实际散热能力进行定量研究,当芯片温度升高后,焊带温度升高,其热导率在高温下发生变化,在以往的研究中,仅存在该材料在20℃时的热导率数据,没有高温热导率的相关数据。

此外,焊带材料高温下热导率与温度的函数关

系尚无理论描述,而作为合金材料,其电阻率与温度存在较为明确的函数关系,可通过建立其电阻率与温度的函数关系,并通过热导率与电阻率的相关理论,进一步建立金锡焊带热导率随温度的变化关系,在以往的研究中,金锡焊带材料的电阻率也仅存在室温下的数据,其高温下电阻率数据需要进行测试。

金锡焊带材料电阻率/热导率随温度的变化关系需要进行研究,热导率的变化对材料在MCM组件中的散热设计造成的潜在影响同样需要进行评估。

本文对金锡焊带材料在高温下的电阻率及热导率进行测试,并基于金锡焊带材料电阻率与温度良好的特征关系,结合Wiedemann-Franz法则建立不同温度下热导率与电导率的对应关系,得到其热导率随温度变化关系的表达式。最终采用数值模型评估在上述使用背景中不同温度工况对金锡焊带材料散热能力的影响。

1 实验

1.1 材料

采用牌号为Au₈₀Sn₂₀的金锡焊带材料,对于同样的材料牌号,不同厂家在成分及生产过程控制存在一定程度的差异,为了更充分地研究该材料电阻率及热导率温度特性,选用了两个厂家(厂家A与厂家B)的材料同时开展研究,电阻率测试试样规格为0.03 mm×1 mm×300 mm,测试温度点208、253、298、398及423 K。热导率采用密度与比热容及热扩散系数的乘积得到,由于密度随温度的变化相对较低,本次采用金锡焊带的室温密度14.52 g/cm³,比热容测试的试样规格为0.03 mm×1 mm×200 mm,测试温度点298、348、398、423 K,热扩散系数测试的试样规格为Φ9.8 mm×δ2.2 mm,测试温度点298、348、398、423 K。

1.2 实验方法及仪器

分别采用FLUKE 8508A高精度万用表、NETZCSH DSC 214 Polyma差式扫描量热仪及NETZCSH LFA 467 Hyber Flash闪射法导热仪参考GB/T 351—1995、ASTM E 1269—2011及GB/T 22588—2008进行不同温度下电阻率、比热容及热扩散系数测试。

2 结果与讨论

2.1 不同温度下电阻率测试结果及电阻温度系数计算

通常对于金属单质元素,其导电主要靠金属中的自由电子运动完成,当温度升高后,其中自由电子的动能增加,产生散射的概率升高,且温度是材料原子动能的微观体现,所以单质金属的电阻率与温度的关系呈现良好的正线性关系。

对于合金而言,其在凝固的固液转变过程中通常会形成固溶体相^[3]。固溶体的溶剂晶格中溶入溶质原子后,溶剂的晶格发生扭曲畸变,对晶格的周期势场发生了改变,对自由电子的束缚作用升高,此外合金凝固过程中通常形成多相,晶界的数量及不规则度有较大提升,自由电子运动过程中受到晶界的阻碍与散射作用同样提升,导致合金的电阻率通常高于其单质组分的电阻率,且其电阻率随温度的变化关系随具体晶格结构及晶界的形式呈现出不同的表现形式。

Au₈₀Sn₂₀合金属于AuSn二元共晶体,共晶点为553 K^[4]。在此温度下,共晶反应为液相L→ξ+δ,其结构由具有ξ(Au₅Sn)镁型六角密排结构的ξ(Au₅Sn)相和δ(AuSn)金属间化合物组成^[5],δ相是一种金属间化合物,其熔点为692 K,具有NiAs型六角结构^[6]。

综上可知Au₈₀Sn₂₀合金在凝固过程中形成具有ξ相与δ相金属间化合物的共晶体,其导电特性在室温及随温度变化的规律需要通过试验验证。

不同温度下电阻率测试结果如表1、表2所示。

表1 厂家A金锡焊带电阻率测试结果

Tab. 1 Resistivity test results of gold tin solder strip by manufacturer A

样品编号	manufacturer A				
	$\mu\Omega \cdot m$				
	208 K	253 K	298 K	398 K	423 K
A-1	0.165	0.188	0.206	0.224	0.258
A-2	0.164	0.185	0.202	0.222	0.253
A-3	0.149	0.177	0.192	0.212	0.240
A-4	0.170	0.195	0.215	0.238	0.278
A-5	0.151	0.171	0.187	0.209	0.245
平均值	0.160	0.183	0.200	0.221	0.255
标准差	0.009	0.009	0.011	0.011	0.015
离散系数/%	5.8	5.3	5.5	5.0	5.8

表2 厂家B金锡焊带电阻率测试结果

Tab. 2 Resistivity test results of gold tin solder strip by manufacturer B

试样编号	manufacturer B				
	$\mu\Omega \cdot m$				
	208 K	253 K	298 K	398 K	423 K
B-1	0.171	0.190	0.211	0.229	0.261
B-2	0.172	0.198	0.217	0.239	0.275
B-3	0.157	0.175	0.198	0.222	0.247
B-4	0.153	0.175	0.194	0.215	0.252
B-5	0.172	0.193	0.213	0.229	0.264
平均值	0.165	0.186	0.206	0.227	0.260
标准差	0.010	0.011	0.010	0.009	0.011
离散系数/%	5.8	5.6	4.8	3.9	4.2

若材料电阻率随温度变化呈现线性的函数关系。采用以下公式进行描述:

$$\rho = \rho_0 [1 + a(T - 293)] \quad (1)$$

式中, α 表示电阻温度系数, ρ_0 表示材料20℃时的电阻率, T 为绝对温度,采用最小二乘法对电阻率与温度关系进行拟合,分别得到两厂家拟合结果的拟合系数及曲线图,如图2、表3和表4所示。

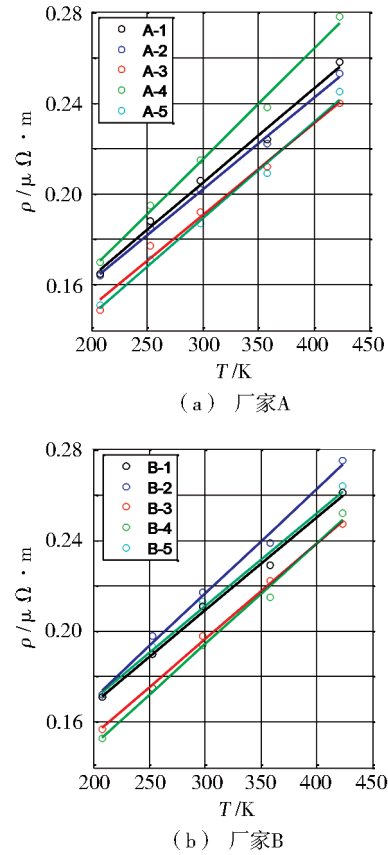


图2 电阻温度系数拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of resistance temperature coefficient

表3 厂家A金锡焊带电阻温度系数拟合结果

Tab. 3 Fitting results of resistance temperature coefficient of gold tin solder strip by manufacturer A

样品编号	$\alpha/10^{-3} \cdot K^{-1}$	$\rho_0/\mu\Omega \cdot m$	相关系数 r
XY-1	2.10	0.202	0.996
XY-2	2.07	0.199	0.998
XY-3	2.19	0.188	0.994
XY-4	2.33	0.212	0.997
XY-5	2.33	0.186	0.996

表4 厂家B金锡焊带电阻温度系数拟合结果

Tab. 4 Fitting results of resistance temperature coefficient of gold tin solder strip by manufacturer B

样品编号	$\alpha/10^{-3} \cdot K^{-1}$	$\rho_0/\mu\Omega \cdot m$	相关系数 r
YS-1	2.01	0.206	0.997
YS-2	2.20	0.213	0.997
YS-3	2.21	0.194	0.999
YS-4	2.40	0.191	0.997
YS-5	2.17	0.208	0.995

由图表可见厂家A及厂家B焊带材料不同试样的电阻率与温度均呈现良好的线性关系,所有试样测试值与线性拟合值的相关系数均>0.99,将厂家A及厂家B测试组的结果分别进行平均,得到厂家A及厂家B的电阻及温度关系函数如下所示:

$$\rho_{\text{A}} = 0.197 \times 10^{-6} [1 + 2.16 \times 10^{-3}(T - 293)] \quad (2)$$

$$\rho_{\text{B}} = 0.202 \times 10^{-6} [1 + 2.12 \times 10^{-3}(T - 293)] \quad (3)$$

将厂家A与厂家B的测试结果进行综合,得到金锡焊带电阻率与温度的变化关系如下所示:

$$\rho = 0.200 \times 10^{-6} [1 + 2.14 \times 10^{-3}(T - 293)] \quad (4)$$

拟合相关系数为0.998,进一步说明金锡焊带电阻率与温度存在良好的线性关系。

2.2 不同温度下热导率测试结果及热导率与电阻率关系

假定金属的声子热导率(λ_{ph})可以忽略,热导率可通过著名的Wiedemann-Franz法则同电导率建立如下联系:

$$\lambda/\sigma = LT \quad (5)$$

式中, L 为洛伦兹系数, σ 为电导率, T 为绝对温度。自由电子模型表明所有金属的 L 都应该为常数,即为Summerfeld洛伦兹常数^[7] $L_0(2.44 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2)$,但事实上洛伦兹系数是一种理想化金属的参数,实际数值会随着材料类型的不同而改变,具体可以参考文献[8-10]中报道的Cu、Al和Ag在300 K时的洛伦兹系数数据。

因此考虑到 L 的这种差异性,Smith和Palmer建立了一个更能准确联系合金热导率和电导率之间关系的表达式,如下所示^[11],

$$\lambda = AL_0T\sigma + B \quad (6)$$

式中,参数 A 表征合金之间洛伦兹系数的差异, AL_0 表示修正后的洛伦兹系数, B 表示声子热导率且一般为常数。Smith和Palmer研究得出铜基合金的参数 $A=0.967$, $B=7.53 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[12]。后续研究者发现Smith-Palmer方程还适用于钛基 $[A=0.997, B=2.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 和铝基合金 $[A=0.909, B=10.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ ^[12-13]。

金锡共晶从单一液相向双相固相转变时,焊料中的这两种相是以金属间化合物形式存在,共晶固溶体将凝固为 σ 相AuSn和 ξ 相Au₅Sn,而铅锡焊料、金硅焊料固相的共晶体则由金属单质元素组成^[14],因此,金锡共晶合金焊料的导热性质与金、锡原子性质有较大区别。

综上,金锡共晶合金焊料在不同温度下的电导率和热导率是否可满足Wiedemann-Franz法则或经过修正的Smith-Palmer方程的规律性需要进一步研

究,通过对不同温度下金锡焊料热导率进行测试,研究其同相应的电导率的变化关系。

热导率的测试数据采用如下公式进行计算:

$$\lambda = \alpha \cdot c_p \cdot \rho \quad (7)$$

式中, λ 为热导率, α 为热扩散系数, c_p 为比热容, ρ 为密度。得到厂家A及厂家B金锡焊带材料在不同温度下的热导率如表5所示。

表5 厂家A及厂家B金锡焊带在不同温度下热导率测试结果
Tab. 5 Test results of thermal conductivity of gold solder strip at different temperatures by manufacturer A and manufacturer B

温度/K	$\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	
	厂家A	厂家B
298	34.9	38.4
348	36.6	40.2
398	37.9	41.6
423	38.5	42.3

经过初步计算,若直接采用Wiedemann-Franz法则通过厂家A及厂家B金锡焊带材料的电导率(电阻率的倒数)对其热导率进行计算,得到结果分别为36.4 W/(m·K)及35.5 W/(m·K),结果与热导率的实测值34.9 W/(m·K)及38.4 W/(m·K)十分接近但存在少量差异,初步说明金锡焊带热导率与电导率的关系总体上符合Wiedemann-Franz法则,进一步采用修正的Smith-Palmer方程对不同温度下的热导率进行拟合,得到厂家A及厂家B金锡焊带材料的拟合系数及相关性结果如表6所示。

表6 厂家A、厂家B金锡焊带在不同温度下热导率拟合系数及相关性

Tab. 6 Fitting coefficient and correlation of thermal conductivity of gold tin solder strips at different temperatures by manufacturer A and B

厂家	拟合系数 a	拟合系数 b	相关系数 r
厂家A	0.82	5.14	0.998
厂家B	0.88	7.19	0.999

由表6可知,厂家A及厂家B焊带的热导率与电导率间的关系很好地符合Smith-Palmer方程所描述的规律,但两个厂家材料的拟合系数存在一定程度的差异。根据两个厂家焊带的其他理化性能数据可知,其在生产工艺及杂质含量控制等方面存在差异,导致其性能指标及变化规律存在一定程度的偏差。将厂家A及厂家B在不同温度点的电导率测试结果进行平均,并对平均后的电导率与热导率采用Smith-Palmer方程进行拟合,得到拟合系数 a 、 b 分别为0.85及6.16 W/(m·K),相关系数为0.999,进一步

说明,Smith-Palmer方程可以较好地描述金锡焊带材料热导率与电导率间的关系,拟合数据如图3所示。

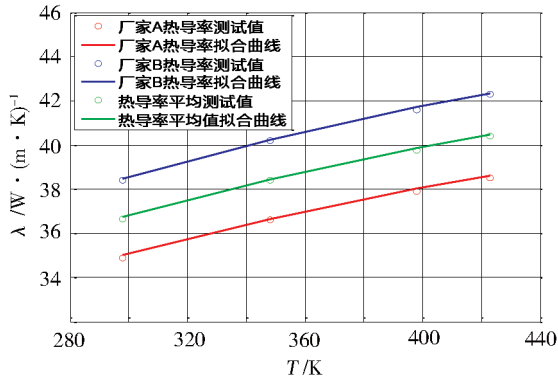


图3 厂家A及厂家B金锡焊带热导率随电阻率变化关系及拟合结果

Fig. 3 Relationship between thermal conductivity and resistivity of gold tin solder strips and fitting results by manufacturer A and B

拟合函数如下所示:

$$\lambda = 0.85L_0T\sigma + 6.16 \quad (8)$$

用 L_c 表示修正后的洛伦兹系数,则修正后的洛伦兹系数 L_c 为 $2.07 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$,声子热导率为 $6.16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。可以看出,金锡焊带热导率与电导率的关系随温度变化的规律偏离Wiedemann-Franz法则的原因主要有以下两点:(1)声子导热承担导热能力所占比例相比电子导热仍在同一量级,不能被忽略^[15]; (2)当电子导热只受弹性散射影响时,对应的洛伦兹系数为 L_0 ^[16],而金锡材料的电子导热部分受到热梯度而非电场引起的非弹性电子-声子散射从而被影响^[17],导致洛伦兹系数产生了一定程度的偏离。

$$\frac{\{[\lambda(T_n) + \lambda(T_{n-1})]/2\}(T_{n-1} - T_n)}{\Delta x} + \frac{\{[\lambda(T_{n+1}) + \lambda(T_n)]/2\}(T_{n+1} - T_n)}{\Delta x} = 0 \quad (12)$$

进一步将时间离散化为 I 个时间,可得到第 n 个节点在第 i 时刻离散后的一维非稳态热传导差分方

$$\rho c \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{\{[\lambda(T_n^i) + \lambda(T_{n-1}^i)]/2\}(T_{n-1}^i - T_n^i)}{\Delta x} + \frac{\{[\lambda(T_{n+1}^i) + \lambda(T_n^i)]/2\}(T_{n+1}^i - T_n^i)}{\Delta x} \quad (13)$$

式中, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ 为热扩散系数。 $F_o = \frac{a\Delta t}{\Delta x^2}$ 称为傅里叶数,将傅里叶数带入式(13),对式(13)进一步简化得到一维稳态热传导差分方程如下:

$$T_n^{i+1} = \frac{F_{on}^i + F_{on-1}^i}{2} T_{n-1}^i + \frac{F_{on}^i + F_{on+1}^i}{2} T_{n+1}^i + \left(1 - \frac{F_{on-1}^i + 2F_{on}^i + F_{on+1}^i}{2}\right) T_n^i \quad (14)$$

在本次应用场景下,芯片工作时表面温度升高,由于芯片体积小热扩散能力强,当芯片工作并处于

将电导率 σ 与温度的关系的表达式带入热导率随电导率变化关系式,并将洛伦兹常数 $2.44 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$ 带入,得到金锡焊带材料热导率随温度变化关系的一元函数如下所示:

$$\lambda = \frac{2.07 \times 10^{-8} T}{0.200 \times 10^{-6} [1 + 2.14 \times 10^{-3} (T - 293)]} + 6.16 \quad (9)$$

将式(9)进一步简化,得到焊带材料热导率随温度变化关系的简化形式如下:

$$\lambda = \frac{0.103T}{1 + 2.14 \times 10^{-3} (T - 293)} + 6.16 \quad (10)$$

3 修正传热模型及传热能力评价

结合以上分析内容可知,在 $298 \sim 423 \text{ K}$ 的范围内,焊带材料的热导率呈现随温度增加递增的关系,具体关系如式(10)所示。结合焊带材料作为芯片散热模块的应用场景,若将其热导率视为常数,其散热能力将会与实际情况产生一定程度的偏差,对于其热导率随温度变化对其在不同温度条件下散热能力的影响需要进一步研究。

当材料进入稳态传热阶段时,其一维传热方程的数学表达式为:

$$\frac{d[\lambda(T) \frac{dT}{dx}]}{dx} = 0 \quad (11)$$

当将 λ 随 T 的关系式带入上述微分方程后,得到 λ 随 x 的变化关系为超越函数,难以进一步对数据进行分析处理,本次采用离散化的数值方法对其寻求近似解,将求解区域的空间离散为 N 个节点,其中第 n 个节点离散后的一维稳态热传导差分方程如下式所示:

程如下式所示:

高温时,其与焊带材料接触端的边界近似认为是恒温边界模型;焊带另一端连接铜管,由于铜的热导率高,可以将热量快速导出,可认为焊带与铜管接触端的边界条件同样为恒温边界,温度为室温。分别将边界温度设置为 $(298 \text{ K}, 423 \text{ K})$ 、 $(298 \text{ K}, 398 \text{ K})$ 、 $(298 \text{ K}, 348 \text{ K})$,所有节点的初始温度设置为 298 K ,采用模拟热扩散的方式对焊带材料的稳态温度场进行求解,采用 0.01 K 的误差作为收敛条件,将温度场的初始条件及边界条件代入上式进行迭代计算,得

到不同温度边界条件下,变热导率与恒定热导率在假设条件下焊带材料稳态温度分布的对比如图 4

所示。

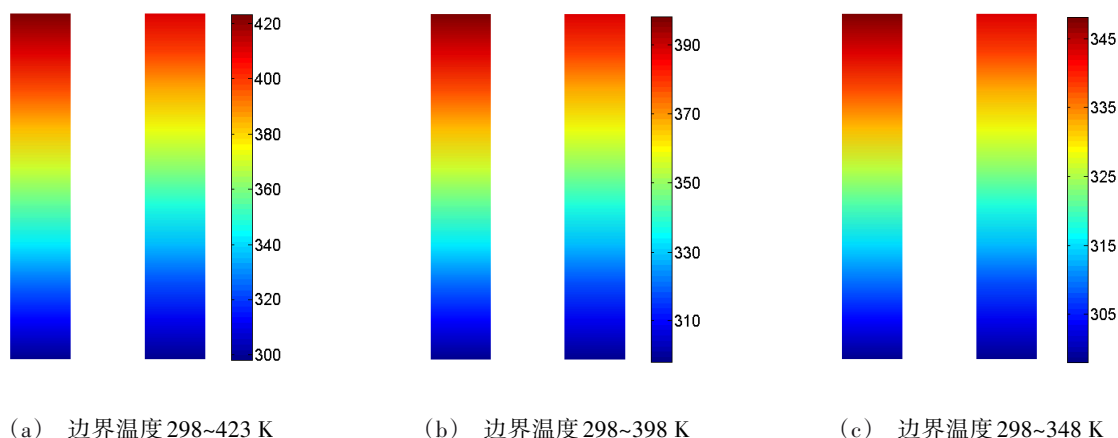


图 4 不同边界温度下考虑热导率温度效应与不考虑热导率温度效应温度分布对比

Fig. 4 Comparison of temperature distribution with and without thermal effect of thermal conductivity under different boundary temperatures

图 4 中,左侧为变热导率模型时焊带材料的温度分布,右侧为恒定热导率模型时焊带材料的温度分布,由图 4 可见,采用恒定热导率的假设时,材料内部的温度呈现均匀的梯度分布,当采用变导热模型时,材料近高温侧的温度梯度降低,而近低温侧的温度梯度升高,上述趋势随边界温差的增加更加明显。

不考虑材料形状因素对热流密度造成的差异,以(298 K, 348 K)边界条件下恒定热流作为参比值,得到在不同温度边界条件下采用两种模型的参比化热流密度对比如表 7 所示。

表 7 不同模型及边界条件下稳态热流密度对比
Tab. 7 Comparison of steady-state heat flux under different models and boundary conditions

边界条件 /K	恒定热导率模型时参比化热流密度	变热导率模型时参比化热流密度	热流密度参比化增量/%
298~423	2.50	2.64	5.5
298~398	2.00	2.10	4.9
298~348	1.00	1.03	2.6

由表 7 可知,采用变热导率模型后,在稳态导热材料在不同温度边界下传输的热流密度相比恒定热导率模型均有所上升,且呈现随边界温度差值的增加而增加的趋势,在本次设置的最大温差(298~423 K)条件下,采用变热导率模型计算得到的热流密度增量达到 5.5%。可知随着高温区温度边界条件的上升,采用恒定热导率模型所计算得到的热流密度会越发偏离真实水平,在长期使用过程中,金锡焊带材料产生的累计热耗散能力将会产生较为明显的差异,导致进行热设计时材料用量与使用边界条件等的设置产生偏差。

4 结论

(1)金锡焊带电阻率与温度呈现良好的线性关系,分布公式为:

$$\rho = 0.200 \times 10^{-6} [1 + 2.14 \times 10^{-3} (T - 293)]。$$

(2)金锡焊带热导率与其电阻率的关系符合 Smith-Palmer 方程,将金锡焊带电阻率与温度的函数关系带入,得到其热导率随温度变化关系的函数为:

$$\lambda = \frac{0.103T}{1 + 2.14 \times 10^{-3} (T - 293)} + 6.16。$$

(3)金锡焊带在 MCM 组件散热的服役背景下,当芯片表面温度达到 423 K 时,采用变热导率的模型计算得到的热流密度相比恒定热导率的假设高 5.5%,且芯片表面温度越高而模型差异越明显,当芯片服役温度较高时,其传热模型有进行细化的必要性。

参考文献

- [1] 周涛,汤姆·鲍勃,马丁·奥德,等. 金锡焊料及其在电子器件封装领域中的应用[J]. 电子与封装,2005,5(8):4.
- ZHOU T, BOBAL T, OUD M, et al. An introduction to eutectic Au/Sn solder alloy and its preforms in microelectronics/optoelectronic packaging applications [J]. Electronics & Packaging, 2005, 5(8):4.
- [2] 吉家宁. 金锡合金预成型焊片的制备与 AuSn/Cu 界面反应研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2019.
- Ji J N. Preparation of AuSn alloy preformed welding plate and study on interface reaction of AuSn/Cu [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [3] 苗芳,吴遵红,徐义,等. 承压设备金属材料电阻率-温度特性研究[J]. 科技创新与应用,2020(3):5.
- MIAO F, WU Z H, XU Y, et al. Study on resistivity-temperature characteristics of metal materials for pressure

equipment [J]. Technology Innovation and Application, 2020(3):5.

[4] 李茂松, 黄大志, 朱虹姣, 等. 金锡合金自动共晶焊接工艺参数优化研究[J]. 微电子学, 2021(3):51.

LI M S, HUANG D G, ZHU J, et al. Optimization research of automatic eutectic die attach parameters for Au80Sn20 alloy [J]. Microelectronics, 2021(3):51.

[5] CUILIK J, NORIS M R. The Au-Sn phase diagrams [J]. J Alloys Compounds, 1993, 31(2):71-73.

[6] SALAVTORE B, ALAN H. Layer structure and thickness effects on electroplated AuSn bump composition [J]. IEEE Trans. Compon. Package Tech., 2006, 29(3):605-607.

[7] 潘虎成. 镁合金导热性能的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

PAN H C. Investigations on thermal conductivity of magnesium alloys[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[8] HANAOKA Y, HINODE K, TAKEDA K, et al. Increase in electrical resistivity of copper and aluminum fine lines [J]. Materials Transactions, 2002, 43(7):1621-1623.

[9] STOJANOVIC N, MAITHRIPALA D, BERG J, et al. Thermal conductivity in metallic nanostructures at high temperature: Electrons, phonons, and the Wiedemann-Franz law [J]. Physical Review B, 2010, 82(7):075418.

[10] ZHANG W, BRONGERSMA S, RICHARD O, et al. Influence of the electron mean free path on the resistivity of thin metal films [J]. Microelectronic Engineering, 2004, 76(1):146-152.

[11] SMITH C, PALMER E. Trans. AIME [J]. 1935, 117:225.

[12] POWERLL R, TYE R. J. Less-Common Met [J]. 1961, 3: 226.

[13] POWERLL R, TYE R, WOODMAN M. Advances in thermophysical properties at extreme temperatures and pressures [M]. New York: ASME, 1965.

[14] 史超. 半导体封装工艺中金锡共晶焊料性质和制备方法研究[J]. 前沿技术, 2018(4):3.

SHI C. Investigation on the eutectic gold-tin characteristics and preparation methods in semiconductor packaging process [J]. Leading-edge Technology, 2018(4):3.

[15] NATH P, CHOPRA K. Thermal conductivity of copper films [J]. Thin Solid Films, 1974, 20(1):53-62.

[16] KLEMENS P, WILLIAMS R. Thermal conductivity of metals and alloys [J]. International Metals Reviews, 1986, 31(1):197-215.

[17] WHITE G, TAINSH R. Lorenz number for high-purity copper [J]. Physical Review, 1960, 119(6):1869.