「顕微サーモリフレクタンス法によるはんだ接合界面の熱抵抗支配因子の解明」

神戸市立工業高等専門学校機械工学科 三宅 修吾

1 研究の背景と目的

パワーデバイスの高出力化・高機能化開発に伴う実装基板の放熱性改善は常に重要な課題となっている。特に、図1に示すデバイス(熱源)と基板(ヒートシンク)を繋ぐはんだ接合部には高い放熱性が要求されることから,はんだ接合部の低熱抵抗化は必要不可欠である。本研究では、数種のはんだ材料を用いて作製した接合試験片中の接合界面近傍の熱伝導特性をマイクロスケールの高空間分解能で測定し、図2に示す金属間化合物や局所的な元素濃化に伴う熱伝導率の変化を捉え,はんだ接合条件に伴う熱抵抗支配因子を実験的に解明することを目的とする。



図1 デバイスの発熱と放熱経路



図 2 はんだ接合部の金属間化合物例¹⁾

2 研究方法・研究内容

組成の異なる市販の鉛フリーはんだと加熱炉を用いて接合試験片を作製する. 平衡状態 図を基に組成に応じた加熱条件を選択して, 接合界面に様々な金属間化合物や元素拡散領 域を意図的に形成する. 断面試料調製後に顕微サーモリフレクタンス法 (m-TR 法) で金 属間化合物および Sn マトリックス層の熱物性分布を測定し, 接合界面近傍における熱抵 抗の要因について考察するとともに, 接合部の熱抵抗データベースとしての基礎資料を作 成する.

2-1 m-TR 法の概要

図3にm-TR法の原理を示す.強度変 調した加熱用レーザーを反射膜を施し た試料表面に照射すると,試料表面は加 熱周期と試料の熱伝導性に伴う温度変 化を起こす.同時に,表面反射率は温度 上昇に追随して変化する.したがって加 熱光と同じ位置に検出用レーザー光を 連続的に照射すると,検出用レーザーは 加熱周期と同じ周波数で試料特有の位 相が遅れた反射光として検出される(サ ーモリフレクタンス).この位相を光学 条件を考慮して解析することで,反射膜



図 3 m-TR 法の原理

直下の熱物性を知ることができる. さらに加熱光の周波数を 100kHz から 1MHz という具 合に高周波数にすると、例えば純 Sn の場合、試料表面からの熱の侵入深さが数 μm から サブμm 程度まで浅くなる. この原理を利用することで、深さ方向の情報量を見積ること ができ、マイクロスケールで金属間 化合物を特定することが可能とな る.図4に装置概要を示す.レーザ ー光学系と精密電動 XYZ ステージ により、試料は1µmの位置精度で熱 物性マッピング測定が可能である.

2-2 試験片作製

小型リフロー炉を用いて、シリコン 基板(10×10X厚さ 0.5mm)/はんだ ペースト(狙い厚さ100µm) /純Cu 基板(10×10X厚さ 0.5mm)の試験片 (10×10X約 1.1mm)を作製した. リ フローは本実験のために購入したバ ッチ式はんだリフロー炉(図5左: CIF 社製(仏) FT-03)を用いて大気雰 囲気中にて行った.実験で用いたは んだは、表1に示す6種類(千住金 属工業製エコソルダーペーストシリ ーズ)を用いた.これらは液相線温度 が250℃以上(高温),220~230℃(中 温), 200℃以下(低温)で選定してい る. 各はんだの固相線・液相線温度か らリフロー条件を検討した.また、大 気雰囲気中での接合により接合不良 が生じた場合は、保有していた電気 炉を用いて別途作製した簡易真空加 熱炉(図5右)により接合を行った. いずれもリフロー時間は約4分であ り、炉冷後に試料を取り出して接合





図 5 リフロー炉(左)と真空加熱炉(右)

試験片とした. その後, 接合試験片を接合断面が観察できるように切断・埋込み研磨後, イオンミリングで極平滑断面に仕上げ, 電子プローブ顕微鏡(EPMA: JEOL 製 JXA-8530FPlus)および走査型電子顕微鏡(SEM: JEOL 製 JSM IT200)を用いて接合界面近傍の 元素分布と金相組織観察を行った. さらに m-TR 法測定用の試料調製として, 組織観察後 の試料表面に DC マグネトロンスパッタリング法を用いて, 厚さ 100nm のモリブデン反射 膜を成膜した.

略号	組成	固相線温度	液相線温度
	(wt%)	(°C)	(°C)
No.1	Sn-10Sb	245	266
(M-1)	Sn-0.7Cu-Ni-P	228	230
(M-2)	Sn-3.5Ag	221	223
No.2	Sn-3.0Ag-0.5Cu	217	220
(M-4)	Sn-3.4Ag-0.7Cu-3.2Bi-3.0Sb-0.04Ni	210	221
No.3	Sn-58Bi	139	141

表1 はんだ試料一覧(()の試料は本報告書では割愛)

2-3 熱物性測定実験

m-TR 法を用いて2通りの熱物性測定実験を行った.

(1) はんだ母相および金属間化合物(IMCs)の熱物性に及ぼすはんだ組成の影響調査 作製したはんだ接合試料について、Sn 母相および金属間化合物の熱浸透率を評価した. 加熱周波数を変化させて見えない界面を考慮した解析を行い¹⁾、それぞれの相の熱浸透率 を求め、Sn 以外の組成との関係について調査した.

(2) はんだ接合界面近傍の熱物性分布と金属間化合物の熱伝導率調査

接合界面近傍の約 10×10μm 領域の位相測定から熱浸透率分布を調査した.上記(1)と同様に測定周波数を変化させた位相測定から熱浸透率を求め,別途計算した熱容量値を用いて金属間化合物と特定される領域の熱伝導率を算出し,はんだ組成との関係を調査した.

3 研究成果

図 6 に断面観察の代表例として Sn-3.5Ag-0.5Cu の組織観察結果を示す. 基板 側に Cu₃Sn, Sn 相に近い少し大きめの化 合物は Cu₆Sn₅, 白く細長いものは Ag₃Sn である事が確認された. その他のはんだ においてもそれぞれ特徴的な金属組織 が確認された.

(1) はんだ母相および金属間化合物の 熱物性に及ぼすはんだ組成の影響

m-TR 法計測装置付帯の CCD カイラ で確認した画像から Sn 母相と IN 定し,既知試料 (Si, ホウ珪酸ガ 作成した校正曲線を用いて熱浸 出した. 図 7 に液相線温度の異 的な 3 試料のデータ (液相線温 10Sb > Sn-3.0Ag-0.5Cu > Sn-58Bi) 結果として Sn-3.0Ag-0.5Cu (No.2 母相と IMCs とも高い熱浸透率を 一方 Sn-Sb (No.1) ではリフロー いて Sn と Sb の置換型固溶体が ることで, Sn 母相の熱伝導性が ためと考えられる. 同じく Sn-3.0 系より低い熱浸透率を示した

 (No.3) では、Sn 母相中に数μr 編状の Bi 相が明確に確認された 熱浸透率結果については、m-TR 注 置の空間分解能が影響している。

れ、更に高空間分解能計測による調査が 必要であると思われる.また、IMCsにお



いても、Sn 母相の測定結果と熱浸透率の関係が概ね一致した. SEM/EDS により元素分析 した結果、Sn-10Sb と Sn-58Bi の IMCs 中に、それぞれ微量の Sb, Bi が添加される結果が 得られた. IMCs 中の Sb および Bi の存在については、さらなる調査が必要であると思わ れるが、熱浸透率低下の要因のひとつであると推察される.

(2) はんだ接合界面近傍の熱物性分布と金属間化合物の熱伝導率調査

図8にIMCs近傍の熱浸透率マッピング結果を示す.加熱周波数は試料によって100kHz から500kHz,あるいは1MHzまでの範囲で行った.加熱周波数は表面直下の見えない界 面の存在状態で異なるため、データを確認しながら試行錯誤する必要がある.図8では先 に示した3試料について加熱周波数500kHzで測定したデータである.図中の赤色部が光 熱浸透率、青色が低熱浸透率を示す.いずれもバラツキが大きく安定した領域を特定する 事が困難であったが、黄色破線領域の平均値を用いてIMCsの熱伝導率の推定を試みた. まず位相マトリックス解析法を用いて²⁾、位相測定値と校正曲線から得られた熱浸透率を 用いて測定部の体積熱容量を導き、熱浸透率と熱容量から熱伝導率を算出した.この時、 Mo反射膜の熱伝導率を必要とするため、熱伝導率が既知である単結晶シリコンを用いて 位相測定と解析を行い、Mo反射膜が0.5 Wm⁻¹K⁻¹と特定して位相マトリックス解析を行っ た.これらの解析結果から各試料におけるIMCsの熱伝導率は、Sn-10Sbが31.6 Wm⁻¹K⁻¹、 Sn-3.0Ag-0.5Cuが37.7 Wm⁻¹K⁻¹、Sn-58Biが25.0 Wm⁻¹K⁻¹であると推定された.

以上により、各種はんだ接合部の Sn 母相および IMCs 相における熱伝導率・熱浸透率を 把握することができた. 今後も精度向上とデータ蓄積を継続しデータベース化を目指す.





図 8 IMCs 近傍の熱浸透率マッピング測定結果(500kHz)と熱伝導率解析結果

4 生活や産業への貢献および波及効果

特に微小な金属間化合物の熱伝導率を評価できたことは、接合部の熱抵抗改善に大きく貢 献出来る評価技術として期待できる.さらにこの知見を基に研究を発展させることで、次世 代 SiC デバイス実装に向けた銀ナノ粒子焼結接合や瞬間発熱接合などの新たな実装技術へ の適用に加え、従来のはんだ接合技術全体の信頼性向上に確実に貢献する.これらの技術は、 自動車用パワーデバイスのみならず、兵庫県が推進する新医療技術や水素エネルギー利用 技術などに不可欠な高機能・高信頼性デバイス開発へも既に波及しつつある.

謝辞

本研究の推進に際し,試料調製および電子顕微鏡観察で多大なご支援とご助言を賜りました,JAPAN TESTING LABORATORIES 株式会社 末包聖人様,茨城大学大学院理工学研究科教授 西剛史様,京都先端科学大学工学部 教授 生津資大様に深く御礼を申し上げます. 参考文献

- 1) 三宅修吾ら, *日本金属学会誌*, **74-**11(2010), 740-745.
- 2) S. Miyake et al., Meas. Sci. Techno., 28(2017), 075006-1-7.