

周期加熱サーモリフレクタンス法による マイクロスケール界面熱抵抗測定法の開発

Development of Microscale Measurement Technique for Interfacial Thermal Resistance using Periodic Heating and Thermorefectance Method

80814998 秋葉洋 (Yo Akiba) Supervisor: 長坂雄次 (Yuji Nagasaka)

1. 緒 論

近年の半導体デバイス分野では、加速する電子機器の小型化・高機能化のニーズに対応するため、複数の LSI チップを 1 パッケージ内に高密度格納する技術が広く普及しつつある。このようなデバイスを総称して System in Package (SiP) と呼ぶ[1]。SiP デバイスは一般的に発熱密度が高く、局所熱流束は数 100 W/cm² に達することもあることから、より精緻な熱管理システムの構築が強く求められている。

SiP デバイス内部の主要な伝熱経路であるフリップチップ接続部では、高温環境下における拡散層内の亀裂や空孔の発生による経時劣化が報告されている[2]。本研究では、マイクロ接合界面の劣化現象が熱抵抗変化に与える影響を定量的に評価することを目的とし、光学的な熱物性センシング手法である周期加熱サーモリフレクタンス法を用いて、マイクロスケールの界面熱抵抗を測定する方法および装置の開発を目指している。

2. 測定原理

周期加熱サーモリフレクタンス法は、加熱・温度検知ともにレーザを用いた非接触測定法である。Fig. 1 に測定原理を示す。周期変調したレーザを試料表面に照射すると、変調周波数と同期した温度応答を生じる。ここで加熱面に別のレーザを入射すると、その反射光強度は表面反射率の温度依存性にしたがって周期変化し、加熱光の周期に対して位相遅れを生じる。このとき位相差に含まれる熱物性情報を解析することで、界面熱抵抗を求めることができる。

試料 1 層目および 2 層目の熱伝導率をそれぞれ λ_1, λ_2 、温度伝導率を α_1, α_2 、厚みを l_1, l_2 、界面熱抵抗を R とすると、位相差は以上のパラメータと変調周波数 f の関数として(1)式のように表される。

$$\Delta\phi = F(\lambda_1, \lambda_2, \alpha_1, \alpha_2, l_1, l_2, R, f) \quad (1)$$

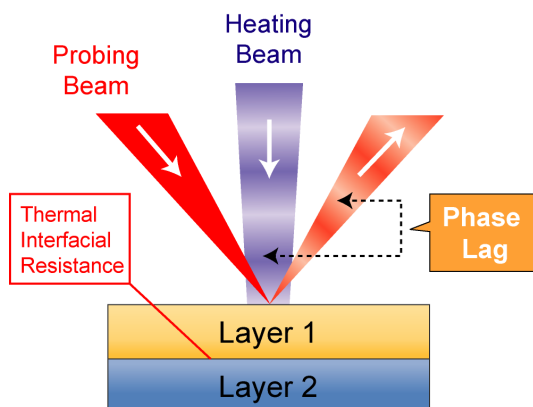


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement principle.

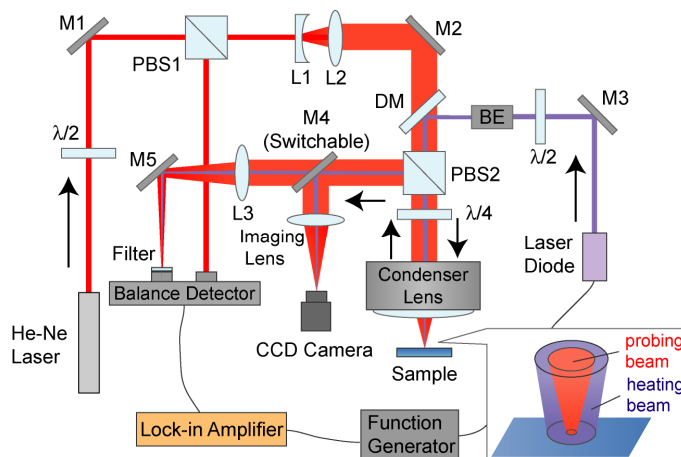


Fig. 2 Experimental Apparatus.

3. 測定装置

Fig. 2 に本研究において開発した装置の概略図を示す。加熱光として波長 405 nm、出力 100 mW の半導体レーザ、温度検知光として波長 633 nm、出力 1 mW の He-Ne レーザを用いている。各レーザのビーム径を調整し、ダイクロイックミラーにおいて同軸化した後、集光レンズによって試料表面上に直径 60 μm の加熱スポットおよび直径 10 μm の温度検知スポットを実現している。集光位置は CCD カメラによってモニタリングされる。加熱光はファンクションジェネレータを用いて正弦波変調されており、参照信号がロックインアンプに送られる。一方、検知光を試料表面で反射後、バンドパスフィルタを介してバランスディテクタに導かれる。検知信号はロックインアンプに入力され、参照信号との位相差が計測される。

4. 熱抵抗評価用パッケージ基板

Fig. 3 にフリップチップ接続部の断面構造例を示す。本研究では、実際の接続工程と同様に作製された熱抵抗評価用パッケージ基板を測定試料として用いる。本試料は 8 mm $\times$ 8 mm $\times$ 0.3 mm の Si チップ表面周縁部に Al パッドを配置し、表面径 70 μm 、高さ 30 μm の接続用 Au バンプを搭載したものである。Fig. 4 にバンプ部の拡大画像を示す。本試料を用いて、Si チップ-Au バンプ間の界面熱抵抗を測定する。

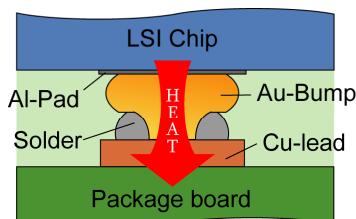


Fig. 3 Cross sectional diagram of the Flip-Chip junction area.

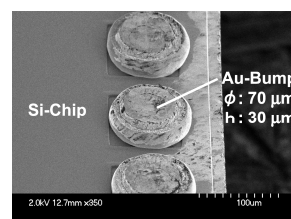


Fig. 4 Close-up image of the package substrate.

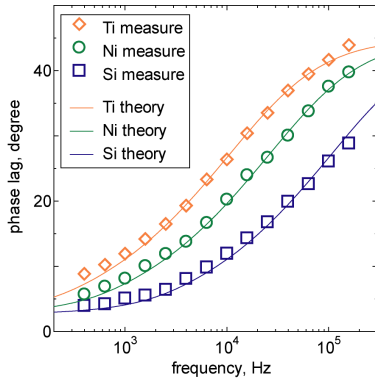


Fig. 5 Test measurement results for single-layered samples.

5. 単層試料の熱抵抗測定

開発した装置が理論で記述される通りに動作するかを検証するため、熱物性値が既知である Ti, Ni および単結晶 Si の測定を行った。各試料とも厚みは 200 μm であり、熱抵抗 (厚み/熱伝導率) に換算すれば $9.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{K/W}$, $2.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{K/W}$, $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{K/W}$ となる。Si のみ吸収層として厚み 150 nm の Au 膜を形成した。ここで、各試料の表面が 20 mm $\times$ 20 mm と加熱スポット径 60 μm よりも充分大きいため、測定にあたっては試料面方向への熱伝導を考慮した三次元理論が適用される。したがって支配方程式は(2)式に示すような円筒座標系の三次元熱伝導方程式となる。また、試料表面の境界条件は(3)式に示すように加熱光強度のガウス分布を考慮する必要がある。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_0 e^{-\frac{2r^2}{l^2}} e^{-i\omega t} \quad (3)$$

Fig. 5 に、各試料の位相差測定結果および三次元理論によるシミュレーション結果を示す。各試料において測定値は理論と良好な一致を示した。これより、単層試料における $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ m}^2\text{K/W}$ の熱抵抗を本装置を用いて正しく測定可能であることが示された。

6. 二層試料の界面熱抵抗測定

パッケージ基板の測定に先立ち、開発した装置を用いてマイクロスケールの界面熱抵抗およびその変化が測定可能であるか検証するため、接合界面を有する二層試料を作製し、接合前および接合後における界面熱抵抗を測定した。

6-1. 二層試料の作製

パッケージ基板の構造をシミュレートするため、厚み 300 μm の単結晶 Si および厚み 30 μm の Au を熱圧着の手法により拡散接合した。Si 表面に厚み 200 nm の Al 膜をスパッタリング形成し、Au と接触させ一定圧力下で高温放置することで界面での拡散が進行し、Al-Au 接合界面が形成される。Fig. 6 (a)に接合前の界面、Fig. 6 (b)に接合後の界面を観察した断面 SEM 画像を示す。接合により界面の空隙が消失している様子を確認でき、これより接合後の界面熱抵抗は接合前より低下すると予想される。

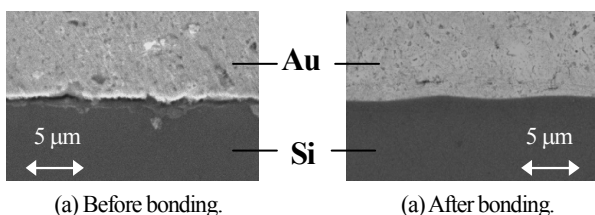


Fig. 6 Cross sectional image of Au-Si interface.

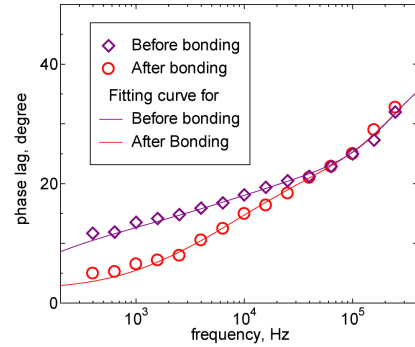


Fig. 7 Measurement results for Au-Si double-layered sample.

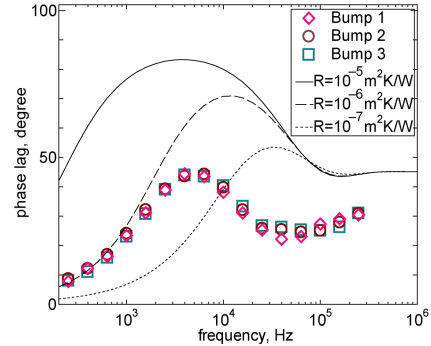


Fig. 8 Measurement results for package substrate.

6-2. 界面熱抵抗変化の測定

接合前および接合後の試料の位相差測定結果および、三次元理論を用いて各測定値に対し界面熱抵抗をパラメータとしてフィッティングした曲線を Fig. 7 に示す。各測定値に対して良好にフィッティングを行うことができ、得られた接合前および接合後の界面熱抵抗はそれぞれ $3.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$, $3.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{K/W}$ であった。接合前の値については、大曾根らにより単結晶 Si および Al 合金(各厚み 200 μm)の低接触圧力下における界面熱抵抗が 10^{-5} オーダーと測定されていることから[3], 妥当な値であると判断できる。本結果より、接合による約 2 オーダーの界面熱抵抗の低下を検知することに成功した。

7. パッケージ基板の測定

パッケージ基板の測定にあたり、バンプ表面が加熱スポット径と同等であることから、Au 部で一次元熱伝導、Si 部で三次元熱伝導を仮定した理論を新たに適用した。位相差の測定結果および新理論によるシミュレーション結果を Fig. 8 に示す。ランダムに選んだ3つのバンプの測定値は良好に一致した。しかしながら理論とは一致せず、界面熱抵抗を算出できなかった。実際には Au 部でも加熱光のガウス分布に伴う三次元熱伝導が生じると考えられ、Au 部の境界条件をより厳密に設定した理論を導出・適用することで熱抵抗評価が可能になると考えられる。

8. 結論

◇周期加熱サーモリフレクタンス法を用いて、マイクロスケールの界面熱抵抗を測定する装置を開発した。
◇接合界面を有する Au-Si 試料を作製・測定し、マイクロスケールにおける $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ m}^2\text{K/W}$ の界面熱抵抗変化を検知した。
◇パッケージ基板の測定を行い、精緻な熱抵抗評価のためには Au バンプ境界条件の厳密な設定が必要であることを示した。

参考文献

- [1] 赤沢隆, SiP 技術のすべて, 工業調査会 (2005).
- [2] N. J. Noolu et al., *J. Mater. Res.*, **19**, 5 (2004), 1374-1386.
- [3] Y. Ohson et al., *J. Heat Transf.*, **121**, 4 (1999), 954-963.