得ることが認められる。

6. 結 論

ガラスエポキシ基板上の銅ランドに銅合金 (C7250) リードを接合したマイクロソルダリング接合部に存在する内部欠陥や、外部欠陥の検出の可能性の検討を、熱伝導シミュレーションと実験を用いて行い、以下の主な結論を得た。

1) 熱伝導モデルを構成し、レーザ照射時での接合部の温度シミュレーションにより実験結果との誤差 5% 以下で接合部表面の温度分布を求める事が可能である。

2) 接合状態を接合界面での熱伝達率によって表現して接合部表面温度分布をシミュレーションにより解析した結果、接合界面の状態がリード表面の温度上昇に反映されている。

3) 接合界面に存在するボイドや未接合などの内部欠陥を接合界面に熱流を遮断する領域を作成する事により表現し、レーザ照射時での接合部温度をシミュレーションにより解析した。その結果、欠陥が存在している接合部の表面温度 $T_{(d)max}$ と、欠陥が存在しない接合部の温度分布の最高温度 $T_{(n)max}$ の差 ΔT_{max} ($T_{(d)max} - T_{(n)max}$) により欠陥情報が得られる事を示した。

4) ソルダ、2 種の接着剤による接合部にレーザを照射し、その表面温度を計測する事により、接合材の違

いが表面温度情報により得られる事を実験的に示した。この事は逆に表面温度情報より接合界面情報が得られる事を物語っている。

5) 実際の QFP のガルウィング型リードのソルダリング接合部を対象として、接合部にレーザを照射し、接合部熱画像を解析する事によりボイド、未接合など接合欠陥の検出可能性があることを実験的に示した。

参 考 文 献

- 1) ㈱日本プリント回路工業会編, “表面実装技術 (SMT) の動向調査報告書”, ㈱日本プリント回路工業会, (1992), p. 319-351.
- 2) 仲田ら: “低温反応接合材利用による接合プロセスの低温化および接合品質の向上”, “微細電子材料の接合現象とプロセス制御に関する研究 (第 3 報)”, 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 1, (1993), p. 202-208.
- 3) 日本機械学会編, “伝熱工学資料 改訂第 4 版”, 日本機械学会, (1987), p. 314-316.
- 4) 三菱電機機, 合金製品技術資料, No. 277006.
- 5) 日本マイクロエレクトロニクス協会編, “厚膜 IC 化技術”, 工業調査会, (1984), p. 8.
- 6) 岩田ら: “熱伝導シミュレーションによる接合部の欠陥の検出条件及び検出限界寸法の検討—レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部欠陥検出に関する研究 (第 2 報)—”, 溶接学会論文集, Vol. 11 (1993), No. 4, p. 515-519.

熱伝導シミュレーションによる接合部の欠陥検出条件 及び検出限界寸法の検討*

—レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部欠陥検出に関する研究 (第 2 報)—

岩田 剛治**, 仲田 周次***

Optimal Detection Condition and Minimum Defect Size for Detection by Computer Simulation*

—Detection Process on the Defect in the Micro Joints by Infrared
Thermal Imaging with Laser Irradiation (2nd report)—

by Yoshiharu Iwata** and Shuji Nakata***

The position and size of internal defect, optimal detection condition and minimum defect size on the inspection are investigated on the computer simulation on thermal model of the joint.

The size and position of internal defect can be determined by the area of temperature above T_c on the joint surface, and then optimal detection condition (laser power, taking time of thermal image) are decided by the relation between temperature behavior of the joint under laser irradiation and characteristics of thermography.

Furthermore, minimum defect size on the inspection is influenced by kinds, thickness of the lead and thermal transfer coefficient at the interface of the joint, and is nearly $50 \mu\text{m}$ in the case of the micro joint between copper alloy lead with $150 \mu\text{m}$ thickness and glass epoxy substrates (1.6 mm thickness).

Key Words: detection process, micro-joints, interface, thermal imaging, heat transfer coefficient, laser, computer simulation

*原稿受付 平成 5 年 5 月 28 日 平成 4 年度秋季全国大会で発表

**学 生 員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate School, Osaka Univ.

***正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Eng., Osaka Univ.

1. はじめに

本研究は、レーザ照射型熱画像法によりマイクロ接合部の欠陥検出方法に関するもので、前報では、ガラスエポキシ基板上の銅ランド上にリードを接合したマイクロソルダリング接合部、ヒータチップ接合によりアルミナ基板上のAg/Pdランド上にリードを接合した接合部等に存在する種々の接合欠陥など接合界面情報が、接合部の表面温度分布の解析により得られる事を理論的及び実験的に明らかにした。

本報告は、前報で検出の可能性の検討を行った欠陥のうち、内部欠陥特に未接合欠陥を対象にして、接合部の表面温度分布の解析による欠陥寸法や位置の決定、欠陥検出条件の選定の考え方、さらにその検出限界寸法を熱伝導シミュレーションモデルを用いて検討したものである。なお、温度分布の数値解析などには前報と同様汎用有限要素法プログラムのANSYSを用い、コンピュータとしては、Sun SPARC station 2を使用し、積分タイムステップは約11 nsで行っている。

2. 熱伝導モデルに基づく数値シミュレーションに使用した各種材料の物性値

熱伝導モデル構造の形状・寸法は前報で報告したものと同様であるが、今回はリード材の熱伝導率の欠陥検出への影響を検討するため、リード材料としてCu-Ni-Sn Alloy (C7250) のほか 42Alloy, 純銅を用いた。これらの材料定数を Table 1 に示している¹⁻³⁾。

3. 接合部温度分布シミュレーションによる内部欠陥の適正検出条件の選定および検出限界寸法の検討

3.1 接合部表面温度分布解析による接合部欠陥寸法・位置の同定

まず、内部欠陥の欠陥情報をリード表面での温度分布の変化から抽出するために、表面温度分布の時間的変化および欠陥の大きさとしきい値 T_c を越える温度領域の大きさととの関係を検討した。なお、ここで、しきい値 T_c とは欠陥の無い接合部表面における最高温度 $T_{(n)max}$ である。接合界面での欠陥の大きさとしては50, 150, 250, 350, 400 μm 角を想定したモデルを用いてシミュレーションを行った。レーザ照射後10 ms および100 ms で250 μm 角の欠陥が存在する接合部の表面温度でしきい値 T_c を越える温度領域を調べたのが Fig. 1 (a)(b)である。図

からも分かるように検出時間（レーザ照射時より撮像時までの経過時間）が10 ms でも100 ms でも欠陥の接合部表面温度分布におけるしきい値 T_c （時間により変化する）を越える温度領域の大きさは10 ms で150 μm , 100 ms で175 μm でほぼ一定であり、またその位置も時間的に変化していない。この事は、上記の検査対象の構造、材料を前提にした場合、ある時間範囲内では欠陥検出時

Fig. 1 Temperature distribution at the surface of the micro joint (Q : 3.2 W, defect size 250 $\times$ 250 μm). (a) laser irradiation time: 10 ms (T_c : 324.3 K), (b) laser irradiation time: 100 ms (T_c : 380.2 K).

Fig. 2 Influence of defect size on temperature distribution at the surface (Q : 3.2 W, laser irradiation time: 100 ms, T_c : 380.2 K). (a) defect size: 50 $\times$ 50 μm , (b) defect size: 150 $\times$ 150 μm , (c) defect size: 250 $\times$ 250 μm , (d) defect size: 350 $\times$ 350 μm , (e) defect size: 400 $\times$ 400 μm .

Table 1 physical properties of the materials.

Property Material	Thermal conductivity W/(mK)	Specific heat J/(Kg K)	Density Kg/m ³
Pure Cu	398.00	386.00	8880
Cu-Ni-Sn Alloy (C7250)	46.00	376.56	8900
42 Alloy	15.00	502.08	8250
Pure Sn	64.00	235.00	7300
Pure In	82.00	243.00	7310
Glass epoxy	0.63	1500.00	1770

Fig. 3 Relationship between defect size and the surface temperature region above T_c at the joints.

Fig. 4 Relationship between defect size and ΔT_{max} .

Fig. 5 Relationship between laser irradiation time and ΔT_{max} under various defect size.

Fig. 6 Relationship between power input Q and maximum surface temperature ΔT_{max} under several laser irradiation time.

間に関わらず欠陥の位置が求められることを示している。

また欠陥の寸法を50~400 μm 角に変えたときのしきい値 T_c を越える温度領域を調べたのが Fig. 2 (a)(b)(c)(d) (e)である。この図に示すとおり50 μm 角の欠陥でもその影響は接合部表面に現れている。さらに、欠陥の寸法が大きくなるに従い、しきい値 T_c を越える温度領域が大きくなっており、その領域と欠陥の寸法の関係は Fig. 3 に示してある通りである。なお、ここで、接合面積 S_0 、熱伝達率 h_{l-1} 、 h_{l-2} は図中に示す値を採用している。この事はしきい値 T_c を越える温度領域の大きさにより50 μm 以上の欠陥のサイズが決定でき、また、欠陥寸法の増加にともない T_c 以上の温度領域の寸法はほぼ比例的に大きくなる事を示している。但し、欠陥のサイズが大きくなり、リード幅に近づくに従い、 T_c 以上の温度領域の寸法が急激に大きくなっているのは欠陥による影響がリードの端で熱が反射しているためであると思われる。

このとき、Fig. 4 に示すように ΔT_{max} は欠陥寸法が大きくなるに従い大きくなっている。また、Fig. 5 に示すように ΔT_{max} は時間的に10 ms と短時間で急速に上昇し、その後上昇速度が急減する傾向にある。

なお実際上の接合部欠陥の検出では、この ΔT_{max} が熱画像撮像装置の温度分解精度以上でなければ、その欠陥が検出できないこととなり、この ΔT_{max} の大きさが欠陥の検出度合を決定する重要な因子の一つである。

3.2 欠陥検出条件の選定についての検討

次にレーザー照射型熱画像法による欠陥検出プロセスにおける欠陥検出条件について検討する。ここに欠陥検出条件のパラメータとしては、1)レーザー光の出力、2)レーザー照射時間、3)熱画像取得時間がある。このうちレーザー照射時間と熱画像取得時間は同じ時間を採用している。ここでは、熱画像取得時間(t)、レーザー光の焦点での出力(Q)について検討する事にする。

前項で欠陥検出精度を決定する因子の一つが ΔT_{max} である事を述べたが、欠陥寸法及び出力 Q の変化で ΔT_{max} がどの様に变化するのかを接合界面に250 μm 角の欠陥を作成したモデルを用いて調べたのが Fig. 6 である。この図に示すように、 ΔT_{max} は熱画像の取得時間に関わらず出力 Q に比例する。従って欠陥検出条件とし

ては検出時間が短く、 $\Delta T_{\max}$ を大きくした方がよいが、現実には出力 Q を大きくすると Fig. 7 に示すように、 $T_{(n)\max}$ は出力 Q とともに大きくなり、 $T_{(n)\max}$ が大きくなると接合部の品質を劣化させたり、検出対象部の機能を低下させたり破壊する可能性がでてくる。また、逆に出力 Q を小さくして $T_{(n)\max}$ を小さくし過ぎると一般に熱画像による温度計測精度が悪くなる。そのために出力 Q の大きさはある範囲に制限される。

また、熱画像取得時間 t に対しても熱画像撮像装置の撮像速度 (33 ms/frame)、温度計測の精度、熱画像の安定性等から余り短くできない。

また、接合部の温度上昇は Fig. 7 に示すように 10 ms までに大きく、その後ゆっくりと上昇している事より、熱画像の取得時間の誤差を考えると、 t は 10 ms 以降の方が良いと考えられる。

これらの事を考慮して欠陥検出条件を考えた時、赤外線撮像装置の性能⁹⁾、対象物の耐熱性よりリード表面最高温度 $T_{(n)\max}$ としては 353 K (80°C) 程度を (本実験の場合、 Q にして 3.2 W 程度)、また熱画像取得時間 t としてはレーザー照射開始後 100 ms が適切と考えられる。

3.3 欠陥の検出限界寸法の検討

次に欠陥の検出限界寸法を明らかにするために前項で選定した条件 ($Q: 3.2 \text{ W}$, $t: 100 \text{ ms}$) を用いて 3.2 項の条件での検出限界寸法について検討を行った。今接合部での熱伝導を第 1 近似として線形と考えると、欠陥のある接合部での温度分布は、欠陥の無い接合部の温度分布に、欠陥の界面よりの熱反射による温度上昇を重ね合わせたもので表現できる。そのため、欠陥検出限界寸法を決定するパラメータとして熱源の熱拡散の大小を決定するパラメータであるリードの材質、熱源からの距離を決めるリード厚 d_i 、リードから熱を奪うパラメータとして接合界面での熱伝達係数 h_{i-1} がある。これらのパラメータは接合部の構造が異なる事により変化する。また、これらのパラメータが変化すると、たとえ入熱 ($Q \times \eta$) が一定でも $T_{(n)\max}$ が変化する。そこで、ここでは $T_{(n)\max}$ が一定となる条件下でリード材質、リード厚 d_i 、熱伝達係数 h_{i-1} の影響を検討した。

まず、リードの材質による欠陥検出限界寸法への影響を調べるためにリード材質の $\Delta T_{\max}$ への影響を検討した。ここで、リードの材質としては、42Alloy、純銅、Cu

-Ni-Sn Alloy を用いた。なお、これらの材質を採用したのは実用上リード材として採用され、かつその温度拡散係数が、それぞれ 3.62×10^{-6} , 1.17×10^{-4} , $1.37 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ と大きく異なっているためである。

これらのリードを用いたシミュレーション結果に Fig. 8 に示す。この図に示すように $\Delta T_{\max}$ は 42Alloy、Cu-Ni-Sn Alloy、純銅と温度拡散係数が大きくなるほど小さくなる。つまり、温度拡散係数が小さいほど欠陥による温度分布の変化を拡散させにくいので $\Delta T_{\max}$ が大きくなり、欠陥の検出限界寸法がより小さくなる事を示している。

次に、リード厚 d_i の欠陥検出限界寸法への影響を調べるためにリード厚 d_i の $\Delta T_{\max}$ への影響を検討した。なおリード厚として 50, 100, 150 μm (いずれも Sn メッキ 22 μm を付加している) を用いた。これらのリード厚 d_i を用いたシミュレーション結果を Fig. 9 に示す。この図に示すようにリード厚 d_i が薄くなればなるほど $\Delta T_{\max}$ が大きくなっていく事が理解される。これは欠陥から観察面の距離が小さくなるにつれて欠陥の影響が出易く、

Fig. 8 Behavior of $\Delta T_{\max}$ under several lead materials with different heat diffusivity (Defect size: 250 μm , $t: 100 \text{ ms}$).

Fig. 7 Relationship between $\Delta T_{\max}$ and time under several laser power input.

Fig. 9 Relation between $\Delta T_{\max}$ and lead thickness under several defect size (Defect size: 250 μm , $t: 100 \text{ ms}$).

Fig. 10 Influence of h_{i-1} on $\Delta T_{\max}$ (Defect size: 250 μm , t : 100 ms).

欠陥の検出限界寸法がより小さくなる事を示している。

次に、接合部界面の熱伝達係数 h_{i-1} の欠陥検出限界寸法への影響を調べるために接合部界面の熱伝達係数 h_{i-1} の $\Delta T_{\max}$ への影響を検討した。なお、接合部界面の熱伝達係数 h_{i-1} としては $10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ から $10^{10} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ までを用いた。これらのモデルのシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。図に示すように接合部界面の熱伝達係数 h_{i-1} が小さくなるにつれて $\Delta T_{\max}$ は初め一定であるが、 h_{i-1} が $10^7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下になると、 $\Delta T_{\max}$ が大きくなっていき h_{i-1} が $10^4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 付近で $\Delta T_{\max}$ が最大となり、それを越えると、再び小さくなり、 h_{i-1} が $10^2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ になると、 $\Delta T_{\max}$ がほぼ 0 になる。これは、熱伝達係数が大きいときは、ランドに熱を奪われすぎるため、欠陥による温度分布の変化が拡散され、また h_{i-1} が小さいと、 h_d との差がなくなり、欠陥による温度変化は小さくなってしまいうからであると考えられる。

4. 結 論

ガラスエポキシ基板上の銅ランドに銅合金リード、純銅リード及び 42Alloy リードを接合したマイクロ接合部にレーザを短時間照射した場合の接合部内部温度分布および表面温度分布を熱伝導モデルを用いて数値解析し、レーザ照射型熱画像法による各種欠陥の適正検出条件の考え方および検出可能な欠陥寸法とリード材、リード寸法、接合界面での熱伝達係数との関係について理論的に検討した。この主な結果は以下の通りである。

1) 未接合またはボイドのような内部欠陥寸法、位置はリードおよび基板などの材質、形状寸法が与えられた場合、欠陥が存在する場合のリード表面での温度分布より欠陥がない場合の最高温度で 2 値化された温度領域の寸法、位置で検出する。

また、内部欠陥が存在することによる表面温度上昇 $\Delta T_{\max}$ は欠陥寸法が大きくなるとともに上昇する傾向にある。

2) 欠陥検出の為の適正条件は、接合部の温度上昇速度、 $\Delta T_{\max}$ と時間や入熱との関係、赤外線検出素子の特性と接合部の耐熱性を勘案した上で $\Delta T_{\max}$ を最大にする条件にすることが必要である。本実験ではリード表面最高温度としては 353 K (80°C) 程度を、また熱画像の撮像時間としてはレーザ照射開始後 100 ms が適切な条件となる。

3) 未接合またはボイドの欠陥検出限界寸法は、リード材が Cu-Ni-Sn Alloy の場合、リード厚 150 μm で約 50 μm の接合欠陥が検出可能となる。また、欠陥検出限界寸法はリードの材質にも依存し、同じ 250 μm の欠陥でも温度拡散係数が大きい純銅のリードの場合 $\Delta T_{\max}$ は Cu-Ni-Sn Alloy の場合の約 0.08 倍となり、逆に温度拡散係数が小さい 42Alloy リードの場合 $\Delta T_{\max}$ は約 1.7 倍となり、温度拡散係数が小さくなるにつれて検出精度が向上する。

4) 未接合またはボイドの欠陥検出精度はリードの厚さに依存し、同じ 250 μm の欠陥でも 50 μm 厚の場合だと、150 μm の場合の $\Delta T_{\max}$ の値の約 3.4 倍の値となり、欠陥検出精度が向上する。

5) 検出可能な未接合またはボイドの欠陥検出精度は h_{i-1} に依存し、 h_{i-1} が $10^4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 付近で $\Delta T_{\max}$ が最大となる。また、 h_{i-1} がそれ以上になると、小さくなり、 $10^7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ になると、 $\Delta T_{\max}$ が一定になる。また、 h_{i-1} がそれ以下になっても小さくなり、 $10^2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ になると $\Delta T_{\max}$ がほぼ 0 になる。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編, “伝達工学資料 改訂第 4 版”, 日本機械学会, (1987), p. 314-316.
- 2) 三菱電機, 合金製品技術資料, No. 277006.
- 3) 日本マイクロエレクトロニクス協会編, “厚膜 IC 化技術”, 工業調査会, (1984), p. 8.
- 4) 仲田ら: 「マイクロ接合部における欠陥検出の可能性—レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部の欠陥検出法に関する研究(第 1 報)—」, 溶接学会論文集, Vol. 11 (1993), No. 4, p. 509-515.