鉛フリーはんだのエレクトロマイグレーション耐性簡易評価手法の開発

A simple approach to test and evaluate the electromigration resistance of lead-free solder

○学 日野 航太 (東北大院)

フェロー 坂 真澄 (東北大)

Kohta Hino, Tohoku University, Aoba 6-6-01, Aramaki, Aoba-ku, Sendai

Masumi SAKA, Tohoku University

Key Words : Electromigration, Lead-free solder

1. 緒言

近年、電子デバイスの高集積化により金属配線やはんだ接合の微細化が進展している。配線の微細化は電流密度の増加を招き、それに伴うエレクトロマイグレーション(EM)の発生が問題となっている。EM は高密度電子流による原子の拡散現象であり、配線にボイドやヒロックといった欠陥の形成を招く害悪要素である⁽¹⁾。

一方、人体や環境に対する悪影響の懸念から、電子デバイスに使用されるはんだは鉛を含まない鉛フリーはんだへと変遷しつつある。例えば EU では RoHS 指令(特定有害物質使用規制: the Restriction of the use of certain Hazardous Substances)において電子デバイスへの鉛の使用が原則禁止されている。これにより種々の鉛フリーはんだの開発が進められており、それらはんだの特性を簡便に評価する手法の開発は重要である。

本報では鉛フリーはんだの EM 耐性を簡便に評価する手法として、鋭利な先端を有する銅配線および鉛フリーはんだからなる試験片を用いた試験法を提案し、理論計算により本試験法による鉛フリーはんだの EM 耐性評価が電流、温度なる試験パラメータの値によらず一貫性のあるものであることを実証する。また実際に試験片を作製し、通電試験前後での試験片表面変化を観察し、EM の発生を確認する。

2. 原理

Fig. 1(a)に示すような、鋭利な先端を有する領域 A およびその周囲を覆う領域 B からなる、厚み t 、領域 A 間の距離 L の試験片を仮定する。領域 A は銅配線、領域 B ははんだである。それぞれの領域の抵抗率を ρ_A 、 ρ_B とし、これらの関係が $\rho_A \ll \rho_B$ であり、電流が領域 A から B を通り再び A を通過する状況と考え、電流密度が領域 A の先端で集中し、近似的に点入出力になっていると考えられる。そこで領域 A を流れる電流を I とすると、カソード先端部での電流密度は、

$$j_r = -\frac{I}{2\pi r t} \quad (1)$$

として表される。ここで r は出力点からの距離であり、 $r \ll L$ である。また電位 ϕ について Ohm の法則を用いると、

Fig. 1 Schematic illustration of (a) current supply and (b) evaluation area of the electromigration resistance.

$$\phi = \frac{\rho_B I}{2\pi} (\ln r - \ln r') \quad (2)$$

となる。

ところで Fig 1(a)の試験片は左右に関して対称形となっており、この場合、温度 T の分布は

$$T = T_0 - \frac{1}{2\lambda\rho} (\phi - \phi_0)^2 \quad (3)$$

と表され⁽²⁾、 λ は熱伝導率、 T_0 は対象軸上の温度、 ϕ_0 は対称軸上の電位であり仮定した試験片では0である。

EM耐性の評価式として、AFD を用いた式を導出する。AFD は原子流束の発散であり、 $AFD > 0$ のときボイドが、 $AFD < 0$ の場合ヒロックが形成され、次式で表される⁽³⁾。

$$AFD = C' \rho \frac{1}{T^2} \left(\frac{Q}{kT} - 1 \right) \exp \left(-\frac{Q}{kT} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x_1} j_1 + \frac{\partial T}{\partial x_2} j_2 \right) \quad (4)$$

ここで C' は負の値を持つ材料定数、 Q は活性化エネルギー、 k は Boltzmann 定数である。また x_1 、 x_2 は Fig 1(a)に示したように直交座標系の座標である。

以上より EM 耐性の評価式として、単位時間あたりに発生したボイド、もしくはヒロックの体積 v/τ を求める。評価領域を Fig 1(b)に示す $r^* < r < r^{**}$ なる円環領域と定めると、

$$\begin{aligned} \frac{v}{\tau} &= t \Omega \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_{r^*}^{r^{**}} AFD dr d\theta \\ &= -\Omega C G \alpha \frac{I^3}{t^2} \left(\ln r^{**} \cdot \ln \frac{L^2}{r^{**}} - \ln r^* \cdot \ln \frac{L^2}{r^*} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、 Ω は原子体積、 C は C' を含む材料定数であり、 G は $T \doteq T_0$ を考慮して次式で表される。

$$G = \frac{1}{T_0^2} \left(\frac{Q}{kT_0} - 1 \right) \exp \left(-\frac{Q}{kT_0} \right) \quad (6)$$

導出した評価式から、本手法による EM 耐性試験のランク付けが試験条件によらず、一貫性のあるものであるかを確認する。そのためには試験条件と材料物性による係数が独立であれば明らかである。ところが式(6)より係数 G が、物性値である Q と試験条件 T_0 の関係式になっている。この場合 ΩC と G の物性値による変化が同様であればよい。 ΩC は有効電荷数 Z^* に比例する数であり、異種はんだ間での違いは主に Z^* から生じる。また Z^* は EM 耐性の大きいほど小さい値をとることが報告されており⁽⁴⁾、従って EM 耐性が大きいほど ΩC は小さくなる。一方、 G は T_0 がはんだ融点までの範囲で Q の増加に伴って減少することがわかる。 Q が大きいということは EM 耐性が大きいということがいえるので、 G も EM 耐性が大きい材料ほど小さい値をとる。従って本手法の EM 耐性評価は、一貫性のあるものであるということがいえる。

3. 実験方法

EM 耐性試験に用いる試験片の模式図を Fig. 2 に示す。試験片は銅配線および鉛フリーはんだから構成され、主な寸法として配線間距離 300 μm 、配線幅 60 μm 、配線直線部長さ 200 μm 、厚み 9 μm である。試験片の作製手順を以下に示す。

プリント基板上の銅配線にフラックスを付与し、はんだ付けを行った。フラックスは洗浄、濡れ性の向上、再酸化の防止のために使用した。また鉛フリーはんだとしては Sn-3.0Ag-0.5Cu を用いた。はんだ付けを行った試験片を、表面に銅配線が露出するまで耐水研磨紙(#2400, #4000)を用いて研磨した。

作製した試験片を用い、加熱温度 333 K、印加電流 160 mA として EM 耐性試験を行った。また通電時間は 10 h で、すべて大気中で行った。

4. 実験結果および考察

EM 耐性試験前後での試験片全体、カソード、アノードの走査型電子顕微鏡(SEM)像をそれぞれ Fig. 3~5 に示す。EM による表面の変化が試験片中央では確認できないが、カソード、アノードの先端部では確認できる。これは電流密度の集中が配線先端で発生し、EM が発生したことを示唆している。またカソードとアノードを比較するとアノードの変化が大きく、配線先端を起点として隆起が発生している。式(4)から AFD を導出すると、カソードではボイドが、アノードではヒロックが発生することがわかるが、ボイドは原子の欠如であり、材料内部で発生した場合変化が表面上で確認し辛い。一方ヒロックは原子の過剰であり、内部から原子が押し出されるため変化が確認しやすく、従ってアノードで変化が大きかったと考えられる。

ところでアノードで発生した隆起について、これはヒロックとは言い難く、発生領域も非常に大きかった。この理由として、はんだ内部での物理的な界面(き裂)の存在が考えられる。Fig. 4 を見るとカソードの配線に沿った黒い筋が確認できるが、これが発生したき裂であると推測される。この筋はアノードでも確認でき、このき裂に沿って原子拡散が発生したと考えられる。その結果、拡散した原子はヒロックとして表面に形成されず、広域な隆起として現れた。実際に Fig. 5 を見てみると、隆起はき裂と思われる部分に沿って発生している。き裂が発生した原因について考えると、はんだ付けの際の銅配線への加熱不足が考えられる。銅の熱伝導率は非常に大きく、銅に接触したはんだは急速に熱を奪われ固化する。急速

Fig. 2 Schematic illustration of sample structure.

Fig. 3 SEM images of the sample surface (a) before, and (b) after current supply.

Fig. 4 SEM images of the cathode tip (a) before, and (b) after current supply.

Fig. 5 SEM images of the anode tip (a) before, and (b) after current supply. (c) Lead-free solder is upheaved over a wide area by the effect of electromigration.

に固化するのは銅配線付近のはんだのみであり、その上にははんだ付けを行うことで、急速に固化したはんだとそうでないはんだの間で界面、すなわちき裂が発生したと考えられる。銅配線を直接加熱するのは難しいが、基板を加熱しながらはんだ付けを行うことでき裂発生を緩和することが可能であると考えられる。

5. 結言

鉛フリーはんだのエレクトロマイグレーション(EM)耐性を簡便に評価する手法として、鋭利な先端を有する銅配線および鉛フリーはんだからなる試験片を用いた試験法を提案した。本試験法による評価は試験パラメータによらず一貫性のあるものであることを理論的に示した。実際の試験では EM の影響による表面の変化が確認できた。一方でカソードに見られた変化は本来想定していたヒロックとは言い難いものであったが、これははんだ付けの際に発生したき裂が原因であると推測され、基板を加熱しながらはんだ付けを行うことで緩和が可能であると考えられる。

本研究は財団法人 JKA オートレース補助事業の補助金によったことを記し、感謝の意を表する。

文献

- (1) Ho, P. S. and Kwok, T., *Reports on Progress in Physics*, **52** (1989), 301-348.
- (2) Saka, M., Sun, Y. X. and Ahmed, S. R., *Int. J. Therm. Sci.*, **48** (2009), 114-121.
- (3) Sasagawa, K., Nakamura, N., Saka, M. and Abé, H., *Trans. ASME, J. Electron. Packag.*, **120** (1998), 360-366.
- (4) Shatzkes, M. and Lloyd, J. R., *J. Appl. Phys.*, **59** (1986), 3890-3893.