スーパーコネクトレベルの微細配線パターンに対する電気的信頼性の交流インピーダンス法による評価

佐藤 誠*, 吉原 佐知雄*, 白樫 高史*

Evaluation of Electric Reliability for Super Connect Level Refined Wiring Pattern by Means of AC Impedance Method

Makoto SATO*, Sachio YOSHIHARA* and Takashi SHIRAKASHI*

*宇都宮大学大学院工学研究科エネルギー環境科学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

*Department of Energy and Environmental Science, Graduate School of Engineering, Utsunomiya University (7-1-2 Yoto, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8585)

Abstract

We have fabricated copper refined wiring pattern of super connect level on polyimide. We prepared it by means of semi-additive process, which enabled flat connection between copper pattern and polyimide. The aim of this paper is the evaluation of durability for ionic migration on above newly developed sample under high temperature and high humidity (85°C, 85%RH). We adopted mainly AC impedance method for the analysis of ionic migration. In consequence, incidence of ionic migration was confirmed. By measuring charge transfer resistance by this method, incidence of ionic migration and initial defects of electrodes could be detectable.

Key Words: Super Connect, Ionic Migration, Copper, AC Impedance Method, Polyimide

1. 緒 言

近年、電子機器の小型化、高密度実装などによりプリント配線板における導体間がますます微細化している。現在では、半導体ICとプリント配線板実装の技術差を埋めるスーパーコネク（デザインルール10 μ m前後の配線・接続技術）と呼ばれる新技術体系が注目されており、開発が進められている。また一方では、電子機器の用途が拡大しており、それに伴いプリント配線板の実使用環境が、温度や湿度の影響を受けやすい厳しい環境にも及んでいる。

このような傾向が進展するにつれて、プリント配線板の絶縁信頼性、特にイオンマイグレーション（以下マイグレーションと略す）による絶縁劣化故障が発生しやすくなることが知られており重要な問題となっている。

マイグレーションとは、電気化学的腐食現象の1つであり、プリント配線板など隣接あるいは対向する電極間に吸湿や結露などにより水分が付着した状態で電圧が印加されると、一方の金属電極から他方の金属電極へ向かって金属イオンが移行し、金属または化合物が析出し、電極間が短絡する現象である。そのため、絶縁信頼性を得るうえでマイグレーション性や反応機構を解明することが必要である。

従来のマイグレーション性評価には、金属または金属酸化物の析出に伴う電極間短絡による絶縁抵抗の低下に注目し、短絡故障時間を比較する方法を利用していた。しかし、これらの方法では、マイグレーション発生から成長の過程における反応機構の解析は不可能である。

そこで著者らは、マイグレーションの成長過程における反応機構の解析法として交流インピーダンス法を適用した。交流インピーダンス法はその場測定が可能であり、電極界面の反応機構解析法として有効な手法である¹⁾。

本報告では、スーパーコネクトレベルの銅の微細配線パターンをポリイミド上に形成し、このような基板に対して高温高湿下(85°C, 85%RH)における耐マイグレーション性を交流インピーダンス法により評価した。また、析出物の解析にはSEM, EDXを用いた。なお、基板の作製には高周波特性を考慮し、銅パターンと下地層とのフラットな接続を可能にするセミアディティブ法を用いている。

2. 試料および実験方法

試料には、厚さ25 μ mのポリイミド上に銅の櫛型配線パターンを施した基板を用いた。その櫛型配線の電極長さは1, 2, 3mmと作製されており、さらにそれぞれにL/S (Line & Space)が4/6, 8/12, 12/16 μ mと作製されている。Fig. 1に試料の構造を示す。Fig. 1に示すように、合計9種の櫛型電極を持つ。

実験方法は以下の通りである。イオン交換蒸留水およびエタノールで洗浄した試料を小型環境試験器（エスベック社製）内に置き、試験器内の温度を85°C、湿度を85%RHまで上昇させた。なお、その上昇過程は、基板に結露が起きないように温度上昇を先行させ、その後湿度上昇を行った。試験器内の温度および湿度が設定値に達した後、ポテンショスタットより試料に直流電圧5.0Vを印加し、さらに

Fig. 1 Structure of test sample

Fig. 2 Testing device

振幅 0.35 V, 周波数領域 10 kHz~1 Hz の交流電圧を重畳し, そのときの電流値およびインピーダンスの経時変化を測定した。実験装置図を Fig. 2 に示す。測定時間は 25 時間, インピーダンスの測定間隔は 30 分とした。インピーダンスは周波数応答解析装置: FRA (Frequency Response Analyzer; Eco Chemie BV 社製) を用いて測定し, Cole-Cole プロットを作成し処理した。また, 測定前後の試料表面を電解放射型走査電子顕微鏡: FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope; 日立製作所製) およびエネルギー分散型 X 線分光法: EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy; 日立製作所製) により解析した。

以上の操作を条件が異なる 9 種の楕型電極に対して行い, さらに試料が高温高湿条件下に 25 時間暴露される時間を 1 回とし, その回数を 1 回 (約 25 時間), 2 回 (約 50 時間), 3 回 (約 75 時間) と変化させて耐マイグレーション性の比較および解析を行った。なお, 1, 2, 3 回時すべてについて, 電圧印加時間は 25 時間となっており, 1 回時においては高温高湿条件と電圧印加が 25 時間同時に負荷されている。2 回時の場合は, 最初の高温高湿条件下に 25 時間暴露されるときは, 電圧印加は行っておらず, 次の高温高湿条件下に 25 時間暴露されるときのみ電圧印加が行われている。3 回時も同様に, 最後の高温高湿条件下に 25 時間暴露されるときのみ電圧印加が行われており, その前の 50 時間

Fig. 3 Example of Cole-Cole plots (Case of migration: electrode length 1 mm, $L/S=4/6 \mu\text{m}$, 2 cycle)

Fig. 4 Equivalent circuit

(25×2) は, 電圧印加は行っていない。このような電圧印加なしの時間を設けたのは, 腐食の影響を見るためである。

3. 実験結果および検討

3.1 インピーダンス測定結果

Fig. 3 にインピーダンス測定から作成した Cole-Cole プロットの一例を示す。ここでは, その変化がわかりやすいマイグレーションが発生した場合について示す。また, 得られた Cole-Cole プロットから推定される等価回路を Fig. 4 に示す。Fig. 3 のように容量性半円が第 4 象限に確認され, 判別しにくい溶液抵抗も確認された。この様子は電極の条件によらず同様な結果が得られた。マイグレーションが発生した場合は, その半円が短絡した時間に近づくにつれて縮小していく様子が確認された。マイグレーションが発生しなかった場合は, 半円の大きさは初期状態から変化せず一定であった。そして, 半円の直径より電荷移動抵抗 R_{ct} (Charge Transfer Resistance), 半円の頂点の角周波数 ($\omega_{\max}$) と R_{ct} より界面容量 C (Capacitance = $1/[\omega_{\max} \cdot R_{ct}]$) を求めた^{2),3)}。このようにして, R_{ct} および C の経時変化を異なる電極条件ごとに求めた。その結果は 3.2 節で示す。

3.2 電流値および R_{ct} の経時変化

3.2.1 電極長さ 1 mm の場合

電極長さ 1 mm の条件の各 L/S の電流値変化から, マイグレーションが発生したと考えられるのは $L/S=4/6 \mu\text{m}$ のときのみであった。Fig. 5 に電極長さ 1 mm, $L/S=4/6 \mu\text{m}$ 時の電流値の経時変化を示す。

Fig. 5 Change in current (Electrode length 1 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$)

Fig. 6 Change of charge transfer resistance (Electrode length 1 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$)

Fig. 7 SEM photographs (Electrode length 1 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$, 2 cycle)

電流値の急激な上昇は、その時間においてマイグレーションにより電極間が短絡したことを示す。Fig. 5からマイグレーションが発生したと考えられるのは、高温高湿条件に2回暴露されるときのみであった。また、Fig. 6に電極長さ1 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$ 時の R_{ct} の経時変化を示す。電流値の経時変化からマイグレーションが発生しなかったと考えられる場合は、 R_{ct} は終始ほぼ一定の値を保っていたので、やはり電極界面に大きな変化がなかったと考えられる。一方、マイグレーションが発生したと考えられる場合は、その発生時間（約16.5時間）に至るまでに、徐々に R_{ct} 値が減少していく様子が見られた。そこで、電極に変化が見られるかどうかをSEMにより観察した。その結果、やはり高温高湿条件に2回暴露される場合において析出物が確認されたので、その様子をFig. 7に示す。電流値の変化が瞬時的であることから析出物が焼き切れたことを予想したが、アノード(+)側から析出物が成長しているので、酸化物と

Fig. 8 Change in current (Electrode length 2 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$)

Fig. 9 Change of charge transfer resistance (Electrode length 2 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$)

考えられる析出物が緻密に成長していく形態をとっているものと考えられる。

$L/S=8/12, 12/16\ \mu\text{m}$ の場合は、マイグレーションは発生せず、 R_{ct} はFig. 6の1, 3回とほぼ同じ値を示しており安定していた。

3.2.2 電極長さ2 mmの場合

電極長さ2 mmの条件の各 L/S の電流値変化から、マイグレーションが発生したと考えられるのは、やはり $L/S=4/6\ \mu\text{m}$ のときのみだった。Fig. 8に電極長さ2 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$ 時の電流値の経時変化を示す。Fig. 8からマイグレーションが発生したと考えられるのは、高温高湿条件に1回暴露されるときのみであった。また、Fig. 9に電極長さ2 mm, $L/S=4/6\ \mu\text{m}$ 時の R_{ct} の経時変化を示す。電流値と R_{ct} の経時変化を照らし合わせて検討をすると、Fig. 9から電流値の上昇が見られた高温高湿条件に1回暴露される場合において、 R_{ct} の変化が見られなかった。電流値が急上昇している点は約0.3時間のときであり、インピーダンス測定前に安定に至っているため、インピーダンスには影響が見られなくなってしまうと考えられる。インピーダンスの測定間隔をさらに短くすることにより、変化を追従できると考えられる。一方、Fig. 9から電流値の上昇が見られなかった高温高湿条件に3回暴露される場合において、 R_{ct} の変化が見られる。実際、高温高湿条件に3回暴露される場合の測定後の基板表面のSEM像からは、微量な析出物が確認された。その結果をFig. 10に示す。その際のわずかな電極界面の変化が R_{ct} 値に影響を及ぼしたと考えられる。このような析出が続くと、今回の測定時間範囲内では電流値

Fig. 10 SEM photographs (Electrode length 2 mm, $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$, 3 cycle)

Fig. 11 Change in current (Electrode length 3 mm, $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 12 Change of charge transfer resistance (Electrode length 3 mm, $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$)

の急激な上昇は見られなかったが、より長い時間領域において変化が見られるものと考えられる。

$L/S=8/12, 12/16\text{ }\mu\text{m}$ の場合は、3.2.1 項同様マイグレーションは発生せず、 R_{ct} は安定していた。

3.2.3 電極長さ 3 mm の場合

電極長さ 3 mm の条件の各 L/S の電流値変化から、マイグレーションが発生したと考えられるのは、やはり $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$ のときのみだった。Fig. 11 に電極長さ 3 mm, $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$ 時の電流値の経時変化を示す。Fig. 11 からマイグレーションが発生したと考えられるのは、高温高湿条件に 1 回および 3 回暴露される場合であった。Fig. 11 からわかるように、この場合においては電流値の上昇は終始見られ、マイグレーションの度合いが激しいことが予想される。また、Fig. 12 に電極長さ 3 mm, $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$ 時の R_{ct} の経時変化を示す。マイグレーションは測定開始直後に発生した

Fig. 13 SEM photographs (Electrode length 3 mm, $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$, 1 cycle)

Fig. 14 Composition analysis by EDX

ため、インピーダンスは始めから一点に収束していた。マイグレーションが発生したと考えられる高温高湿条件に 1 回暴露される場合の SEM 像を Fig. 13 に示す。Fig. 13 からやはり大きな析出物が確認され、電極間が完全に短絡している様子がわかった。一方、高温高湿条件に 2 回暴露される場合のみ R_{ct} は終始ほぼ一定の値を保っていたので、電極界面が安定していたと考えられる。

そして、 $L/S=8/12, 12/16\text{ }\mu\text{m}$ の場合は、これまで同様マイグレーションは発生せず、 R_{ct} は安定していた。

3.3 EDX による析出物の解析

Fig. 14 に EDX による析出物の元素分析結果を示す。Fig. 14 から、析出物には銅の他に酸素が多く含まれることわかり、主成分は酸化銅 CuO であると考えられる。これは、先に示したアノードから成長していることと符合する。

4. まとめ

スーパーコネクトレベルの微細配線パターンに対してマイグレーション評価を行った結果、 $L/S=4/6\text{ }\mu\text{m}$ では 25 時間以内に何度かマイグレーションの発生が確認された。また、その他の L/S についてはマイグレーションの発生は確認されなかったが、より長時間の測定では発生する可能性がある。今回は、電極が露出した状態の試料を用いたので、マイグレーションの発生を防止する工夫が必要と考えられる。

高温高湿条件下、櫛型基板を用いるマイグレーション評価に交流インピーダンス法の適用を試みた結果、以下のこ

とがわかった。電極界面の変化に反映して R_{ct} が変化し、マイグレーションに至る場合は、発生前に R_{ct} が徐々に減少していく傾向がある。よって、交流インピーダンス法で電荷移動特性値を測定し、それをモニターすることにより、今回用いた試料に対してもマイグレーションの発生予測が可能であることがわかった。

謝 辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究促進事業（民間基盤技術研究支援制度）によって実施されたものである。
(2003.9.19-受理)

文 献

- 1) 田中浩和, 平松洋昭, 桑川和博, 植田文崇, 吉原佐知雄, 白樫高史: “交流インピーダンス法を用いた鉛フリーはんだのイオンマイグレーション発生過程の解析”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **5**, No. 2, p. 188, 2002
- 2) 藤嶋 昭, 相澤益男, 井上 徹: “電気化学測定法 (上)”, 技報堂出版, 1984
- 3) 逢坂哲彌, 小山 昇, 大阪武男: “電気化学法応用測定マニュアル”, 講談社, 1989