微小結露環境下における各種基材のイオンマイグレーション評価

田中 浩和*, 嶋田 哲也*, 岡本 朗**, 霞末 和男**, 岡田 誠一**

Investigate of Electrochemical Migration on Substrate Board under the Micro Dew Condensation Environmental

Hirokazu TANAKA*, Tetsuya SHIMADA*, Akira OKAMATO**, Kazuo KASUE**, and Seiichi OKADA**

*エスベック株式会社技術開発本部 (〒651-1514 兵庫県神戸市北区鹿の子台南町5-2-5)

**株式会社村田製作所品質保証部 (〒520-2393 滋賀県野洲市大篠原2288)

*Technical Development Headquarters, ESPEC CORP. (5-2-5 Kanokodai-minamimachi, Kita-ku, Kobe-shi, Hyogo 651-1514)

**Quality Assurance Department, Murata Manufacturing Company, Ltd. (2288 Oshinohara, Yasu-shi, Shiga 520-2393)

概要 本研究では、実環境で遭遇する微小結露環境を模擬する新たな試験装置を開発し、その制御された環境下で試料表面の結露粒径や時間経過による結露状態変化、微小結露に対するマイグレーション発生過程やマイグレーション加速因子を検討した。その結果、電極間隔より十分小さな結露も、結露と乾燥サイクルを繰り返すうちに、隣接する結露同士が合体しやすい状態になり、結露水中をマイグレーションが成長する現象をとらえた。さらに、本手法の効果を検証した結果、マイグレーション発生加速因子として印加電圧や結露量のほかに、基材表面における結露粒径や結露付着状態がマイグレーション発生に影響することがわかった。

Abstract

To investigate electrochemical migration (ECM), a relatively new test method has been developed by the authors, which enables real time monitoring of the migration process using microscope observation and insulation resistance measurement under the micro dew condensation environment. This research has focused on studying the dew drop changes and the ECM growth process under micro dew condensation. In addition, we investigated the ECM acceleration factor of each type of test condition using this new method. The results show that the greater the number of test cycles, the more conducive to wetting the surface of the substrate board becomes. When the gap between the electrodes is covered with dew water, the ECM grows into the dew water.

Key Words: Dew Condensation, Electrochemical Migration, Silver, Insulation Resistance, Short Circuit

1. 緒言

電子部品の小型化による電極間隔の狭ピッチ化と電子機器の使用環境の多様化が進んでおり、結露によるイオンマイグレーション（以下、マイグレーション）発生による絶縁信頼性が懸念されている^{1)~4)}。

マイグレーション現象は、共存する水と密接な関係があり、再現性ある評価結果を得るためには、一定量の水の供給が必要である。その評価方法として一般的に用いられている方法は、高湿環境に試料を長時間さらす恒温恒湿バイアス試験である。この方法は、材料への水蒸気吸着と内部拡散によって現象を進行させ、マイグレーション発生による絶縁劣化故障時間を比較する方法であるが、水分の拡散が平衡状態に達するまで長時間に及ぶため試験が長期化する課題がある⁵⁾。一方、水滴を固体表面へ凝縮や滴下させる試験方法としては、温湿度（結露）サイクル試験や水滴下試験 (Water Drop Test) がある^{6)~9)}。これらの試験方法は、実使用条件を模擬した温湿度サイクルを負荷し、試料表面

に結露を凝縮させるか、または水分を滴下してマイグレーションを評価する方法であるが、供給する水滴径が1mm以上になる場合もあり、近年の狭ピッチ化された小型電子部品やプリント回路板のマイグレーション評価にあたっては、試験条件が過酷な状況も想定される。

そこで著者らは、新たな評価試験方法として、微小な結露をシミュレートする微小結露試験方法および装置を開発した¹⁰⁾。これにより、従来では不可能な微小結露状態を、定量的に試料表面に生成させることを行え、さらに、マイグレーション発生過程の可視化も可能となった¹¹⁾。

そこで本研究では、微小結露環境下でのマイグレーション発生機構を解析するために、微小結露に対するマイグレーション発生過程やマイグレーション加速因子を解析したので報告する。

2. 実験方法

2.1 微小結露試験装置と性能

本実験装置は、一定の温湿度と風速環境下で温度プレー

Fig. 1 Schematic illustration of micro dew condensation test equipment

ト表面に直接的に熱伝導させた試料を露点温度付近で制御し、試料表面に $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の微小な水滴径の結露を発生させることを特徴とする。

Fig. 1に開発した装置構成図を示す。試料は、熱伝導シートを介して温度プレート上に取り付けられ、マイクロ스코プの観察ステージ上に固定される。試料上の結露制御は、試料表面に取り付けた結露量センサ（CIS社、BTF-11356A）出力をコントローラにフィードバックすることで行われる。結露状態の観察は、マイクロ스코プにて撮影および記録を行う。試料の絶縁抵抗値変化は、パソコンによって制御された絶縁抵抗計およびスキャナで連続的に記録される。

Fig. 2は、微小結露の発生原理を示している。結露生成過程は、試料を周囲温湿度の露点以下に冷却し試料表面に周囲の水蒸気を凝縮させて結露を発生させる。結露状態の安定化は、結露量センサ出力をモニタしながら、試料を露点温度付近で加熱／冷却し結露量を一定に保つ。乾燥過程は、試料を露点温度以上とすることで水分を蒸発させる。これらの組み合わせによって、結露一定試験または結露と乾燥サイクル試験の2つの運転モードが可能となる。

Fig. 3は、本装置の性能検証としてホウ珪酸ガラスを試料とした場合の、結露量と結露粒径の関係を示している。ホウ珪酸ガラスを用いた理由は、水に対して化学的に安定で、入手性も高い点から選択した。また、結露量の下限值は、結露量センサの感度と装置制御限界から $3\text{ }\mu\text{g}/\text{mm}^2$ にし、上限値は、実際の電子機器の使用時の結露量など市場環境データを参考に $14\text{ }\mu\text{g}/\text{mm}^2$ で設定した¹⁰⁾。

検証結果から結露量と結露粒径は一定の関係であることがわかった。

Fig. 2 Schematics of micro dew condensation and evaporation process

Fig. 3 Relationship between dew mass and dew drop size on borosilicate glass

2.2 微小結露試験によるマイグレーション評価

微小結露状態でのマイグレーション成長過程を観察、および微小結露試験の効果を検証するために、以下のような実験を行った。

2.2.1 マイグレーション成長過程の観察方法

Table 1に試料および試験条件を示す。試料としては、基

材がホウ珪酸ガラスで、その上に焼結銀(Ag)を用いて一對の電極（電極幅=300 μm ，電極間隔=318 μm ）を形成した。

前処理としてイソプロピルアルコールにより超音波洗浄後、アセトン洗いし表面汚れを除去した。試験条件は、5 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ と14 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ を繰り返すサイクル運転とし、試験中は15Vdcを印加し、結露状態とマイグレーション成長過程は光学画像により観察し、さらに、絶縁抵抗値を一定間隔で測定および記録した。

2.2.2 微小結露試験効果の検証方法

Table 2に実験に用いた試料および試験条件を示す。試料は、基材として3種類（アルミナ、石英ガラス、ガラスエポキシ）を用いた。電極形状は、標準試料と同様な対向電極を用い、その電極間隔はJISやIPC規格に準拠した3ピッチ(165, 318, 635 μm)とし、電極材料はすべて銀(Ag)とした。

前処理は、試料をイソプロピルアルコールおよびアセトン洗浄し、結露量が異なる4水準(3, 5, 10, 14 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$)においてサイクル試験を行った。試験中は、直流電圧を印加し絶縁抵抗値と画像を一定間隔で連続記録した。故障判定は

Table 1. Tested samples and testing condition of electro-chemical migration generation process under the micro dew test method

Tested sample	Electrode material	Silver
	Base material	Borosilicate glass
	Electrode gap size	318 μm
Tested conditions	Pre process	IPA and acetone cleaning
	Testing mode	Dew cyclic test
	Damp heat air	25°C 50% RH
	Conditions	5 $\mu\text{g}/\text{mm}^2 \leftrightarrow 14 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ Every 20 minutes
	Apply voltage	15 Vdc
	Measuring	Insulation Resistance Microscope observation

Table 2. Tested samples and testing condition of effective verification under the micro dew test method

Tested sample	Electrode material	Silver
	Base material	Alumina, Silica glass, Glass cloth epoxy (FR-4)
	Electrode gap size	165, 318, 635 μm
Tested conditions	Pre process	IPA and acetone cleaning
	Testing mode	Dew cyclic test
	Damp heat air	25°C 50% RH
	Dew mass conditions	3, 5, 10, 14 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$
	Apply voltage	5, 25, 50 Vdc
	Failure criterion	$\text{IR} \leq 1 \times 10^6 \Omega$

絶縁抵抗値1M Ω 以下として、1M Ω 以下になると通電を停止し、試料の発熱や損傷を防止した。試験結果はワイブルプロットで示した。

3. 結果と考察

3.1 マイグレーション成長過程の解析

Fig. 4は、微小結露試験中の絶縁抵抗値変化、Fig. 5はマイグレーション成長過程の画像である。微小結露試験サイクルの経過に伴い絶縁抵抗値は低下してゆき、約90分後(3サイクル目)に $1 \times 10^{10} \Omega$ 以下に低下し、その後、約130分後に1M Ω 以下の短絡状態となった。記録画像から、初期サイクルでは独立した結露が、サイクルの経過に伴い隣接する結露同士が合体し長円状態となり(Fig. 5(a)~(c))、その濡れ広がった結露水中をマイナス極からプラス極に向けてマイグレーションが成長する過程をとらえた。その後、マイグレーションが電極間を短絡させると隣接する結露が乾燥した状態となった。

以上の結果から、結露サイクルを重ねるうちに、基板表面の濡れ性が徐々に変化し微小な結露が合体しやすい状態になり電子や金属イオンの移動が起こり、マイグレーションが発生したと考えられ、実使用環境においても同様に、独立した微小な結露によっても何度かの結露と乾燥を繰り返すうちに、マイグレーションが発生しやすい環境になってくると推測される。

3.2 微小結露試験の効果

Fig. 6, Fig. 7にアルミナ基材を用いた場合の電極間隔および印加電圧と故障発生時間の関係を示したワイブルプロットを示す。従来の試験法と同様に電極間隔が狭いほど、印加電圧が高いほど寿命が短くなり加速性がみられる。

次に、結露量と故障時間の関係をFig. 8に示す。形状母数(m)に差異は見られるが、結露量が多いほど寿命が短いことより、結露量も加速因子の1つであることが確認できた。

Fig. 9に各種基材と故障時間の関係を示す。アルミナの平均寿命(MTTF)が最も短い結果となり、その次にガラスエポキシに近い値を示した。一方、石英ガラスのMTTFが

Fig. 4 Insulation resistance changes by the migration growth on borosilicate glass under the micro dew test method

Fig. 5 Silver migration growing process on borosilicate glass surface under the micro dew test method (Test conditions: $5 \mu\text{g}/\text{mm}^2 \leftrightarrow 14 \mu\text{g}/\text{mm}^2$, Apply voltage: 15 Vdc)

Fig. 6 Influence of electrode gap size on alumina under application of 25 Vdc

Fig. 7 Influence of apply voltage on alumina under the gap of 318 μm

長い傾向を示した。基材によって寿命の差が出た原因を調査するために、結露量と結露粒径の関係をさらに調査した。

Fig. 10に各種材料の結露量と結露粒径の関係を示す。結露粒径の測定は、結露設定値を3, 5, 10, $14 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ の順に切り替え、結露モニタ量が設定値に到達した直後に、マイクロ스코プの測長機能を利用し、5点以上の結露粒径を測定し、その平均値を算出しプロットした。その結果、ガラスエポキシ基材は、アルミナや石英ガラスに比較し結露粒径が大きく、電極間を水が覆いやすい。そのため、マイグレーションが発生しやすく寿命が短かったと考えられる。一方、石英ガラスは、結露粒径が小さいためマイグレーション発生が抑制されていると考えられる。

しかしながら、アルミナの場合は、結露粒径が小さいにもかかわらず寿命が短くなった理由として、基材が多孔性であるため毛细管現象で結露水の濡れ性が高く、基材表面付近で薄い水膜状になるため、イオンの移動が容易になったと推測される。

それを解明するため微小結露試験後のマイグレーション

Fig. 8 Influence of dew mass on alumina under the gap of 318 μm

発生形態をSEMでを観察した(Fig. 11)。ガラスエポキシ(Fig. 11(a))と比較して、アルミナ(Fig. 11(b))は非常に薄いマイグレーションが観察されたことから、材料表面で薄い水膜があったと推定され、その状態がマイグレーション発生に関係したと考えられる。

Fig. 9 Influence of substrate under the gap of 318 μm

Fig. 10 Dew drop spread changes on various substrate under the micro dew test method

Fig. 11 SEM photographs showing the electrode surfaces after the test (Dew mass: 14 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$, Gap: 165 μm , Apply voltage: 25 Vdc)

以上の結果から微小結露試験の効果としては、従来からマイグレーション発生加速因子として考えられている印加電圧や結露量のほかに、基板材料の濡れ性の違いによる結露付着状態や試験サイクル経過に伴う結露粒径変化などのマイグレーション発生因子の解析として活用可能であることがわかった。

4. 結 論

微小結露に着目して、従来の試験とは異なる新たな試験方法および装置を開発し、その効果を検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 微量な結露を定量的に試料表面に生成させることを行え、さらに、微小結露の状態観察やマイグレーション

ン発生過程の可視化も可能となった。

- (2) 結露と乾燥サイクルを重ねるうちに、基板表面の濡れ性が徐々に変化し、隣接する微小結露が合体しやすい状態になり結露水中をマイグレーションが発生することがわかった。実使用環境においても同様なマイグレーション現象が発生していると推測される。

- (3) マイグレーション発生加速因子として印加電圧や結露量のほかに、基材表面における結露粒径や結露付着状態がマイグレーション発生に影響することがわかった。

(2010.6.1-受理)

文 献

- 1) 金井優子, 沖山静彦, 山田秀雄, 小林佐敏, 渡会郁雄: “イオンマイグレーション試験方法に関する一考察,” 第24回日科技連信頼性保全性シンポジウム報文集, pp. 77-82, 1994
- 2) 青木雄一, 田中浩和, 山本繁晴, 小幡 修: “結露サイクル試験によるイオンマイグレーション評価方法,” 第24回日科技連信頼性保全性シンポジウム報文集, pp. 83-88, 1994
- 3) 伊奈 治, 杉浦昭夫, 岡本真一: “車載用電子部品の結露シミュレーション,” 第14回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, pp. 337-340, 2004
- 4) S. J. Krumbein: “Electrolytic Model for Metallic Electromigration Failure Mechanism,” IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, No. 4, pp. 539-549, 1995
- 5) 電気学会・イオンマイグレーションの発生特性と防止方法調査専門委員会: “プリント基板の試験と評価—イオンマイグレーション現象とその評価,” オーム社, 2007
- 6) IEC: “Environmental testing—Part 2-30: Tests—Test Db: Damp heat, cyclic (12 h+12 h cycle),” Standard-IEC 60068-2-30, IEC, 2005
- 7) 日本電子回路工業会: “プリント配線板環境試験方法—結露サイクル試験,” Standard-JPCA-ET-09, JPCA, 2007
- 8) IPC: “Assessment of Susceptibility to Metallic Dendritic Growth: Uncoated Printed Wiring,” Standard-IPC-TM-650 Method 2.6.13, IPC, 1985
- 9) 松村麻子, 佐竹 学, 野口博司, 岡田誠一: “低電圧領域での Ag, Cu イオンマイグレーション発生過程の解析,” 第32回日科技連信頼性保全性シンポジウム報文集, pp. 79-84, 2002
- 10) 田中浩和, 嶋田哲也, 岡本 朗, 水間良典, 岡田誠一: “微小結露試験方法および試験装置の開発,” 第39回日科技連信頼性保全性シンポジウム報文集, pp. 183-188, 2009
- 11) 岡本 朗, 水間良典, 岡田誠一, 田中浩和, 嶋田哲也: “微小結露試験状態でのマイグレーション不具合に関する考察,” 第39回日科技連信頼性保全性シンポジウム報文集, pp. 189-194, 2009