金属ベースプリント配線板における銅イオンマイグレーションの検討

岡本 健次*, 前田 賢彦*, 芳賀 弘二*

Study of Copper Ion Migration in Metal Base Printed Wiring Boards

Kenji OKAMOTO*, Takahiko MAEDA* and Kohji HAGA*

*株式会社富士電機総合研究所材料基盤・分析研究所 (〒240-01 神奈川県横須賀市長坂2-2-1)

*Materials and Analysis Laboratory, Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd. (2-2-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-01)

概要 汎用インバータなどパワーエレクトロニクス製品では、小型化・高機能化のための高密度実装基板として熱放散性に優れた金属ベースプリント配線板の適用が拡大している。これらの製品は回路電圧が100～400Vで薄膜絶縁層には1～3 kV/mmの高電界が加わることになり、絶縁層の絶縁信頼性が重要な問題として顕在化してきている。そこで筆者らは、特に重要と考えられる直流電圧ストレス下の銅イオンマイグレーション現象に着目し、検討を行った。その結果、(1) 絶縁層の材料によっては加速雰囲気での直流課電試験で絶縁層内部に銅イオンマイグレーションが発生する。(2) 陽イオン、陰イオンによらず絶縁材中にイオン性成分が多量に含まれている場合は銅イオンマイグレーションが発生しやすく、絶縁寿命が極端に短くなる。イオン種として Cl^- 、 SO_4^{2-} 以外にも NH_4^+ の影響が明らかになった。(3) 試料を高温高湿中の状態で、 $\tan \delta$ 、体積抵抗率を測定することにより絶縁層中のイオン性成分量を予測でき、さらに銅イオンマイグレーションの発生を簡便に判断できる。 $\tan \delta$ は50Hz程度の低周波数で測定するのがポイントである。

Abstract

In power electronics products, including general-purpose inverters and power module used 100～400V circuits, metal-base PWBs with superior thermal conductivity have come into wide use as high density mount PWBs to reducing size. Therefore, high electric strength of 1～3kV/mm have induced to insulated layer. Accordingly, we have been studied about copper ion migration phenomena by using some kinds of insulation materials. As a result, growth of copper ion migration is related to the amount of ionic element included in insulation. It becomes clear that NH_4^+ is an important factor in addition to Cl^- and SO_4^{2-} as the type of ion. It is possible to anticipate of the amount of ionic elements in insulation and the growth of copper ion migration by measuring dielectric loss tangent and the volume resistivity under enhanced condition.

1. まえがき

電子機器の小型化に伴い、機器に使用されるプリント配線板への各種部品の実装密度は年々高くなってきている。この高密度実装化では、部品、回路からの放熱が問題となり、特にパワーエレクトロニクス分野の機器では発熱量が大きく、それに用いられるプリント配線板は放熱効果の優れたものが必要となる。

近年、これらの用途で放熱性に優れた金属ベースプリント配線板（以下金属ベース基板と略す）の適用が盛んになっている。この基板はアルミニウム板や銅板のベース金属、無機充てん材入りエポキシ樹脂等の絶縁層、銅箔の三層構造になっており、絶縁層が80～150 μm と薄いため放熱性に優れている。従来は回路電圧が12～24V程度のハイブリッドIC基板として用いられていたが、最近では回路電圧が100～400Vの産業用汎用インバータ、パワーモジュール等のプリント配線板として用いられるようになってきた。し

たがって絶縁層には電界強度で1～3 kV/mmの高い電圧ストレスが加わることになり、絶縁層の絶縁信頼性が重要な問題として顕在化してきている¹⁾。

このようなことから、筆者らは金属ベース基板をパワーエレクトロニクス機器に適用するため、特に重要と考えられる直流電圧ストレス下の銅イオンマイグレーション現象（以下マイグレーションと略す）について検討を行ったので報告する。

2. 金属ベース基板におけるマイグレーション

金属ベース基板は、絶縁層が無機充てん材入りエポキシ樹脂で構成されたものが一般的である。これを用いて誘電特性とマイグレーションの関係について検討した。

2.1 試料

試料には、絶縁層が無機充てん材入りエポキシ樹脂で耐熱性の異なる金属ベース基板2種類（A、B）を用いた。図1に試験片の形状を示す。電極は銅箔を $\phi 20\text{mm}$ にエッチ

図1. 誘電正接 ($\tan \delta$) 測定および課電用試験片

ングし形成した。

2.2 実験方法

(1) 誘電特性

誘電特性として周波数50Hzにおける誘電正接 ($\tan \delta$) の温度特性をシェーリングブリッジで測定した。

(2) 課電試験

課電試験は、恒温恒湿槽を用い、85℃70%RHの環境下で図1に示す試験片に直流1250Vを印加し（銅箔：陽極、ベース金属：陰極）、行った。なお湿度は一般に85%RHが用いられるが、ここでは実用的なレベルに近づけるため70%RHに設定した。電圧値は表面銅箔エッジ部分で部分放電の影響が出ないように考慮して設定した。

(3) 観察および分析方法

マイグレーションの観察は、実体顕微鏡と波長分散型の走査型電子顕微鏡（SEM-WDX）で行った。

2.3 実験結果および検討

図2に $\tan \delta$ の温度特性を示す。基板AはBに比べ、低い温度から $\tan \delta$ が上昇し始める。

表1に課電試験の結果を示す。基板Aは251～297時間ですべて絶縁破壊したのに対し、基板Bは2600時間を経過しても絶縁破壊に至らず試験を中断した。

図3、図4は課電試験を終了した試料を切断し、断面よ

図2. $\tan \delta$ の温度特性

表1. 課電試験結果

(n=5)	
試料	絶縁破壊時間 (h)
基板A	251 285 285 290 297
基板B	>2600 未破壊

図3. 基板Aの銅元素分布 (285h, BD品)

図4. 基板Bの銅元素分布 (2600h, 未破壊品)

り層方向に生じたマイグレーションを、走査型電子顕微鏡で観察した結果である。基板Aは、銅箔端部の絶縁層に集中するような形で銅元素が分布しており、銅箔からベース金属（アルミニウム）に向かってマイグレーションが発生している。これに対し基板Bは銅箔端部から絶縁層表面方向へわずかにマイグレーションが発生しているのみで絶縁層内部には発生していない。

これらからマイグレーション発生の違いは $\tan \delta$ 特性と関連があることがわかる。本実験では50Hzの低周波数で測定を行った。 $\tan \delta$ は、低周波数側では絶縁体中のイオンをキャリアとする伝導電流に起因し、それは温度上昇により増大する²⁾。したがって、 $\tan \delta$ の大きい基板Aは絶縁層中にイオン性成分が多いと考えられる。これが要因となってマイグレーションが絶縁層中に発生したと推測される。

次に、絶縁層内部にマイグレーションが発生した基板Aについてその進展経路を明らかにするため、走査型電子顕微鏡で詳細な観察を行った。マイグレーションの発生が顕著な箇所を3000倍に拡大して観察した結果を図5に示す。図(a)は反射電子像（組成像）であり、矢印aで示す白色状の粒子がマイグレーションによる析出物で、無機充てん材の間に分布している。矢印bで示す灰色状の粒子が無機充てん材、矢印cで示す黒色部が樹脂である。図(b)は図(a)の銅X線分布像である。両図を見比べると、図(a)中の白色状の粒子の部分にX線像が対応していることがわかる。したがってマイグレーションは、無機充てん材間の樹脂中を進展しているとみられる。

3. イオン性成分と絶縁寿命

前章で基板A、Bではマイグレーションの発生の仕方、そして絶縁寿命が大きく異なることを述べた。そこでこの

図 5. 銅イオンマイグレーションの詳細観察

原因は絶縁層中のイオン性成分と関係があると考え、イオン性成分と絶縁寿命（マイグレーションの発生）の関係について検討した。

3. 1 試料および測定方法

絶縁層中のイオン性成分の抽出は、前章で用いた未課電の供試モデルから抽出用試料を作製し、これを20mlの超純水中に浸し、85℃に加熱し48時間行った。図6にイオン濃度分析用サンプルを示す。イオン濃度の測定はイオンクロマトグラフ（DINEX社製QIC型）を用いた。抽出サンプルは各3個で、同時にブランクも測定した。

なお検討には、基板A、Bとは絶縁層の形態が異なるプリプレグ方式の金属ベース基板をさらに4種類（C～F）追加して、同様に課電試験とイオン濃度の分析を行った。C、Dは無機充てん材入りエポキシ樹脂製プリプレグ、E、Fは充てん材なしエポキシ樹脂製プリプレグを絶縁層に使用しており、またC、Eは硬化剤としてジシアンジアミドを使用している。

3. 2 実験結果および検討

イオン性成分と絶縁寿命の関係を図7に示す。Z軸のppmは絶縁材料の重量に対する濃度である。

(1) 基板A、Bの寿命の差

試料Aは Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ の3種類のイオン性成分が顕著に検出された。特に SO_4^{2-} が509ppmと多い。それに対し試料Bは Cl^- 、 SO_4^{2-} が検出レベル以下で NH_4^+ のみが9.2ppm検出された。両者では著しくイオン性成分量が違い、これが銅イオンマイグレーションの発生の要因となり、絶縁寿命に大きな差が生じたと考えられる。

図 6. イオン濃度分析用サンプル

(2) 試料C～Fについて

なお試料C～Fの金属ベース基板も、イオン性不純物を多量に含むものは絶縁寿命が極端に短くなっている。特に陽イオンの NH_4^+ が多く、これがマイグレーションの発生要因となっていると考えられる。

(3) イオン性成分の役割

陽イオン（ NH_4^+ ）および陰イオン（ Cl^- 、 Br^- 、 SO_4^{2-} ）を多く含む基板で、各イオンがマイグレーションの発生過程にどのように関わっているか考察してみる。

NH_4^+ イオンは、(1) 式に示すように硬化剤のジシアンジアミドが加水分解してできたアンモニア NH_3 と H_2O により生成したと考えられる。これにより生成した OH^- イオンと Cu^+ イオンにより、(2) 式に示すように Cu_2O が生成する。

この Cu_2O は(3) 式に示すように陰イオン X^{n-} と反応して銅化合物や金属銅となる。

したがって、今回の場合は(4)、(5) 式に示すような反応経路が想定される。

図 7. 絶縁材料中のイオン性成分量と絶縁寿命

陽イオン NH_4^+ および陰イオン X^- は上記反応過程に参与し、マイグレーションを発生させたと考えられる。

4. イオン性成分と誘電特性

前述でマイグレーションの発生が $\tan \delta$ 特性と関わりがあり、またそれは絶縁層中にイオン性成分が多く含まれているためだということが確認された。そこで $\tan \delta$ 等の誘電特性により、イオン性不純物の量が予測できるかどうか検討した。構造のシンプルなモデル試料を用いて、各々の湿度における誘電特性 ($\tan \delta$, 体積抵抗率) とイオン濃度との関係について調べた。

4. 1 試料

絶縁材としての樹脂には、主剤にエポキシ樹脂、硬化剤にジシアンジアミドを用いた。硬化剤の配合比は未反応成分を、すなわちイオン性成分の量を変化させることをねらいとして、表2に示す3種類とした。測定用試料は図8に示すようにITOガラス (下部電極) 上に樹脂をコーティングし、120℃18時間の条件で加熱硬化させ、上部電極は金蒸着で形成した。

4. 2 実験方法

(1) イオン抽出

イオン抽出は、樹脂約0.4 g を20 mlの超純水中に浸し、85℃に加熱48時間行った。イオン濃度測定は前章と同じく、イオンクロマトグラフを用いた。

(2) 誘電特性の測定

誘電特性として $\tan \delta$, 体積抵抗率を恒温恒湿槽内に試料をセットした状態で測定した。 $\tan \delta$ の測定はシェーリングブリッジを用い、周波数50Hzで、体積抵抗率の測定は超絶縁計を用いDC100V, 1分値で行った。なお $\tan \delta$,

表2.樹脂配合

(重量比)			
試料	主剤	硬化剤	触媒
A	100	1.57	0.1
B	100	2.36	0.1
C	100	3.14	0.1

図8. 誘電特性 ($\tan \delta$, 体積抵抗率) 測定用試験片

体積抵抗率とも樹脂中への吸水が飽和するまで変化するの
で、 $\tan \delta$ の連続モニタを行い、変化率が0.1%/h以下にな
った時点 (図9) で測定し、その後直ちに体積抵抗率も測
定した。湿度特性の測定はこの方法で、恒温恒湿槽の温度
を85℃一定にし、湿度を40, 50, 70, 80%RHに変化させ、
行った。

4. 3 実験結果および検討

表3に樹脂1 g中に含まれる抽出イオン濃度を示す。硬
化剤の配合比を変化させることにより、樹脂中のイオン濃
度を変化させることができた。

図10に $\tan \delta$ の湿度特性を示す。試料A, B, Cとも湿度
の増加に伴い、 $\tan \delta$ も増加する。また樹脂中の抽出イオ
ン濃度が高い順に $\tan \delta$ の値は大きく、上昇率も大きい。

図11に体積抵抗率の湿度特性を示す。試料A, B, Cと
も湿度の増加に伴い、体積抵抗率は低下する。また、樹脂
中の抽出イオン濃度が高い順に体積抵抗率は低い。

図12に、最も顕著に検出された NH_4^+ イオンについて、
 $\tan \delta$ とイオン濃度との関係を示す。イオン濃度はモル濃
度に換算してある。樹脂中のイオン濃度が増加すると $\tan$

図9. $\tan \delta$ の経時変化

表3.樹脂中の抽出イオン濃度

試料の種類	抽出イオン濃度 (単位: ppm)		
	Cl^-	NH_4^+	K^+
A	11	184	—
B	15	517	1
C	26	596	3

図10. $\tan \delta$ の湿度特性

図11. 体積抵抗率の湿度特性

図12. 誘電正接 (tan δ) とイオン濃度の関係

図13. 体積抵抗率とイオン濃度の関係

δ は増加し、高湿度ではその傾向が顕著になる。図13に、体積抵抗率と NH_4^+ イオン濃度との関係を示す。樹脂中のイオン濃度が増加すると体積抵抗率は低下するのがわかる。

高湿状態にすると体積抵抗率が低下し、 $\tan \delta$ は増加するが、これは水分により樹脂中のイオン性成分が電離し、イオンをキャリアとする伝導電流を増加させているためと考えられる。 $\tan \delta$ は損失電流成分（伝導電流）の充電電流成分に対する割合を示しているため、体積抵抗率の変化と対の現象である。

イオン性成分は水分が存在している場合、さらに温度の

高い場合に電離しやすくなる。したがって高温高湿状態の方がより樹脂中に含まれるイオン性成分の電離を増大させることができる。

これから高温高湿での $\tan \delta$ （50Hz程度の低周波数）や体積抵抗率を測定することにより、マイグレーションの要因となる絶縁材中のイオン性成分の量が推定でき、さらにはその起こりやすさを簡便に判断できると考えられる。

また吸湿による水分も、マイグレーションの大きな発生要因となる。吸湿性は絶縁材料の種類、架橋度、樹脂と充てん材・ガラス繊維との密着度合い等、種々の条件に左右されるが、図9に示すような $\tan \delta$ の経時変化を測定することにより、吸湿速度、絶対レベルを簡易に調べることができる。したがって $\tan \delta$ や体積抵抗率を測定することにより吸湿性も推定でき、前述と同様に絶縁層中で発生するマイグレーションの起こりやすさを簡便に判断できると考えられる。

5. むすび

金属ベース基板の絶縁信頼性にとって、特に重要と考えられる直流電圧ストレス下のマイグレーションについて、検討した結果をまとめる。

(1) 金属ベース基板の絶縁層の材料特性によっては、加速試験で銅箔とベース金属間の絶縁層内部でマイグレーションが発生することがわかった。

(2) 陽イオン、陰イオンによらずイオン性成分が絶縁材中に多量に含まれている場合はマイグレーションが発生しやすく、絶縁寿命が極端に短くなる。イオン種としては Cl^- 、 SO_4^{2-} 以外にも NH_4^+ の寄与が明らかになった。

(3) 樹脂中のイオン性成分の濃度と、高温高湿中での $\tan \delta$ および体積抵抗率の関係を検討した結果、両者には相関がある。 $\tan \delta$ 、体積抵抗率の測定はイオン性成分の量を予測でき、マイグレーションの発生を簡便に判断できる有効な手段と考えられる。また測定方法はイオン性成分の特性を利用するため、①試料は高温高湿条件で吸湿した状態にする、② $\tan \delta$ は低周波数（50Hz近辺）で測定する、ことがポイントである。

金属ベース基板は使用される電圧が高いことから、マイグレーション現象の把握、評価は特に重要と考えられる。適用製品からのニーズとしては熱抵抗の低減、すなわち絶縁層の薄層化が望まれており、今後も現象の把握、有効な評価手段の研究を行い、絶縁信頼性の向上に寄与したい。

(1994.12.8—受理 1995.1.26—再受理)

文 献

- 1) 齋藤重正, 他: “金属ベースプリント基板の評価・分析技術”, 富士時報, Vol.67, No.3, pp.177-181 (1994)
- 2) 犬石義雄, 他: “誘電体現象論”, 電気学会, (1973)