埋め込み受動部品技術に使用されるポリマー抵抗体

師岡 功*, 原崎 一彦**, 榎戸 政文***, バリー・ジョーンズ****

Polymer Thick Film Resistor for Embedded Passive Technology

Isao MOROOKA*, Kazuhiko HARASAKI**, Masafumi ENOKIDO*** and Barrie JONES****

*株式会社アサヒ化学研究所（〒192-0024 東京都八王子市宇津木町656）

**株式会社アサヒ化学研究所開発本部（〒193-0812 東京都八王子市諏訪町251）

***株式会社アサヒ化学研究所販売本部（〒193-0812 東京都八王子市諏訪町251）

****株式会社アサヒ化学研究所（アメリカ，テネシー州）

*Asahi Chemical Research Laboratory Co., Ltd. (656 Utsugi-cho, Hachioji-shi, Tokyo 192-0024)

**R&D Technical Division, Asahi Chemical Research Laboratory Co., Ltd. (251 Suwa-cho, Hachioji-shi, Tokyo 193-0812)

***Sales Division, Asahi Chemical Research Laboratory Co., Ltd. (251 Suwa-cho, Hachioji-shi, Tokyo 193-0812)

****Asahi Chemical Research Laboratory Co., Ltd. (1528 Clear Brook Drive Knoxville TN 37922, USA)

1. はじめに

プリント配線板の内部に部品を内蔵する技術が，にわかには活気づいている。アメリカでは1996年に会社と大学との共同体で，埋め込み受動部品(EP; Embedded Passive)技術を開発するために政府基金による研究・開発プログラムが開始された。この共同体は，遠距離通信用の数種のプリント配線板に，インダクタンス，コンデンサ，高分子厚膜抵抗体(PTFR; Polymer Thick Film Resistor)を埋め込んだ後，1999年に成功裏にその活動を終了した。それ以降，上記の共同体によって最初に開発された埋め込み受動部品技術を使って3千万ピース以上のプリント配線板が生産されている¹⁾。

一方日本では，プリント配線板上に高分子厚膜抵抗体材料を用いて抵抗体膜を形成した高密度印刷抵抗配線板が，部品実装工程での抵抗部品挿入の削減，はんだレスによる信頼性の向上など部品実装におけるコスト低減の手段として約20年ほど前から実用化されていた。

しかしながらチップ部品の最小化と多量生産による低価格化，さらには実装設備の高速化や実装技術の精度アップなどの事由によって，コストメリットでの優位性がなくなり，本格的な発展には至らなかった。

近年，電子機器における能動素子点数に対する受動素子点数はますます増大の傾向にあり，代表的なGSM（世界移動電話規格）電話機には500以上の受動部品が使われている。プリント配線板の半分の容積を占め，さらにははんだ接合の25％に相当する受動部品を膜形成によって内蔵化することは，新たな実装技術として常に生産コストの低減が要求される電子デバイスにあって，必要不可欠な開発技術であると共に大きな貢献が期待される。

本論文は，埋め込み受動部品によるプリント配線板作製

を実現するための識見を提供するもので，埋め込受動部品技術を活用する上での可能性や製品歩留まりの向上などを中心にまとめたものである。またコンデンサの制約や抵抗体のコストについても触れており，埋め込み受動部品のレイアウト・抵抗体の設計・インクのブレンド・デザインなどの評価を論証するためには，ワイヤレスマイクロホン回路の使用例を参考にした。

本論文に紹介した設計および生産のためのガイドラインは，プリント配線板メーカーやセットメーカーの技術者，OEM業者にとって興味ある議題になると考えている。

2. 埋め込み受動部品技術の利点

埋め込み受動部品の使用は，機器の小型化と高性能化・品質の向上・コストの削減などの効果をもたらす。

[機器の小型化と高性能化]

- 1) プリント配線板上の部品点数の大幅削減により，空いた実装スペースへの新しい機能の搭載やプリント配線板サイズの縮小化が可能となる。
- 2) 受動部品の内蔵化で能動部品との立体実装が可能となり，実装設計の自由度が増す。
- 3) 部品間の配線距離短縮は，高速作動を可能にして雑音減少などの機器性能の向上に繋がる。

[機器の品質向上]

- 1) 接続箇所が減り信頼性が向上する。
- 2) 部品の内蔵化は，外圧影響による部品脱落の不良がなくなる。
- 3) はんだ接合部の減少は耐熱性要求の温度低下へ，またははんだ使用量の削減は電子機器の軽量化と環境問題への対応が容易になる。

[コストの削減]

- 1) 部品実装時のアセンブリコストが削減する。

2) 部品在庫の維持費を削減

3. 埋め込み受動部品技術に使用される各種材料

埋め込み受動部品によるプリント配線板作製に使用される材料は、金属ベース材料の薄膜タイプと印刷塗布型の厚膜タイプの2つに大別される。厚膜タイプは金属酸化物をベース材料にした高温焼成システムと、カーボン粉末を樹脂バインダに分散混合した低温硬化システムに分別される。

3.1 薄膜抵抗体材料

薄膜抵抗体材料としては、オメガ社、マクダビット社、シプレ社などから蒸着や無電解めっきによる薄膜形成技術が公表されており、なかでも「オメガプライ (Omega-Ply)」が最も技術確立されている。この技術は銅箔回路上に“ニッケル-リン”の抵抗体を薄膜形成して、エッチングによって抵抗体回路が作製される工法である。25 Ω/□から100 Ω/□までと抵抗値範囲が低抵抗に制約されるが、高品質要求の少量用途に使用されている。

3.2 厚膜高温焼成型抵抗体材料

デュポン社によって開発された新しい技術で、薄膜の銅箔に抵抗体をスクリーン印刷して900°Cの窒素雰囲気炉で焼成する。次にカプセル用ペーストを抵抗体上にスクリーン印刷した後に焼成して、このカプセル化された抵抗体と銅箔をプリント配線板(FR-4)に積層してから、銅をエッチングして抵抗体回路が形成される工法である。10 Ω/□から100 kΩ/□と抵抗範囲は広く、焼成型（サーメットタイプ）の抵抗体材料を使用するので抵抗体はポリマー抵抗体よりも高品質で放熱効果も大きい。工程の複雑さ、抵抗体許容誤差、コスト等を考慮しなければならない。

3.3 厚膜低温硬化型抵抗体材料²⁾ (ポリマー抵抗体)

ポリマー抵抗体の歴史は長く、自動車産業でのセンサ用途や一部にはチップ抵抗部品の代替として活用された時期もある。1996年からはDARPA基金による会社と大学の共同体が取り組んだ埋め込み受動部品技術の開発に、ポリマー抵抗体やオメガプライ抵抗体などが検討されてきた。なかでもポリマー抵抗体は埋め込み受動部品を使った高密度プリント配線板(HDI)に使用され、今日までに約3000万枚が携帯電話機に活用されている。

ポリマー抵抗体は、数種のカーボン粉末と非導電性粉末（シリカ、アルミなど）を熱硬化性樹脂に分散混合したもので、その通電機構は複雑でさまざまな説が提唱されており、一般的には次の2説が支配的である。

- ① 鎖状に連なったカーボン粒子鎖（ストラクチャー）による導電機構。
- ② 分散したカーボン粒子の距離間を電子がジャンプして電気が流れるトンネル効果による導電機構。

前者はFig. 1に示すようなカーボン粒子がお互いに連鎖を形成するか、数Å（オングストローム）以内の至近距離に接近していることが必要であり、この連鎖を形成するた

Fig. 1 Carbon structure in the polymer

めの必要なカーボン粉が配合されて初めて導電現象が現れることになる。しかし、このようなカーボン粒子の連鎖形成という単純な導電機構説では説明のつかない現象もあり、広く分散したカーボン粒子間を電子がジャンプすることにより導電性が生じるとする、いわゆる“トンネル効果”による導電機構説が最近多く述べられている。

ポリマー抵抗体の抵抗値調整は、カーボン粒子を小さくして単位距離に並ぶ粒子数（接触点数）を増すことによって低い抵抗体を作製でき、また高い抵抗体はカーボン粉に非導電性粉（前記の無機絶縁物質の粉末）を混合して通電経路を紆余曲折（曲がりくねった長い経路）させることによって作製される。この場合、カーボン粉末と非導電性粉との混合比率によって低抵抗から高抵抗までの広い範囲の抵抗値をカバーすることができる。

3.4 厚膜低温硬化型誘電体材料

ポリマー誘電体は、高い誘電率のチタン酸バリウム粉と熱硬化性樹脂を混合したものであるが、チタン酸バリウム材料のもつ高いK値(1500~5000)を得ることは難しく、ポリマー誘電体のK値は22~30の範囲内である。この理由の1つは、樹脂バインダの誘電率が低い(2~8)ことに起因しており、高容量のポリマー誘電体を作製するには、チタン酸バリウム粉の微粒化や分散技術を駆使して、いかに充てん量を高めるかがポイントになる。

ポリマー誘電体の形成は、スクリーン印刷法またはローラーコーティング法で行われている。スクリーン印刷法によるポリマー誘電体は、印刷後のピンホールを完全になくすため2度の重ね塗布が必要であり、2回の重ね塗布したポリマー誘電体の容量密度は約6 pF/mm²で、その際の硬化後膜厚は約30 μmである。またローラーコーティング法では12 μmの膜厚で塗布できる感光性現像型誘電体を使用し、容量密度は約17 pF/mm²である。Fig. 2のグラフは、スクリーン印刷法とローラーコーティング法による誘電体の容量範囲を示しており、このグラフの計算式から誘電率は22と考えられる。

容量は次のように計算される。

$$C = 8.8527K (A/d), \text{ここに}$$

$$C = \text{pFで表される容量}$$

Fig. 2 Capacitance range of roller coated photo imageable dielectric and screen printed PTF paste

K=誘電率

A=平方mmで表されるプレート面積

d=ミクロンで表される誘電体厚さ

4. 埋め込み受動部品技術の生産上ポイント³⁾

4.1 ポリマー抵抗体の選択

同一基板上に異なった抵抗値の抵抗体膜を形成するには、15Ω/□から100kΩ/□までの抵抗値をもった各種の抵抗ペーストを単体もしくは相互混合して任意の抵抗値に調整したものを使用する。ここで重要なことは単一の抵抗ペーストを用いた設計面（印刷塗膜の面積コントロール）による抵抗体形成は避け、仕様要求抵抗値に近い抵抗ペーストを使用して数回の印刷塗布によって信頼性の高い抵抗体膜を形成することが望ましい。

4.2 抵抗体の設計と寸法（サイズ）

抵抗体の設計は、要求される抵抗値の範囲と各抵抗体の電力散逸に基づくもので、大まかに言えばRsの面積抵抗値をもつポリマー抵抗体材料は、0.25Rsから10Rsの抵抗値範囲をカバーすることができる。面積抵抗値は抵抗体のアスペクト比に関係しており、Fig. 3を参照すると、長さ/L、幅/W、厚さ/t、の抵抗体はL/Wのアスペクト比であり、その抵抗体が2のアスペクト比であれば、その寸法形状は2倍の平方（/□）として表現される。したがって100Ω/□の面積抵抗をもつポリマー抵抗体を使って200Ωの抵抗体を生産することができる。面積抵抗の単位は抵抗体の厚さを暗示しており、実際の抵抗体は12μm前後の厚さで印刷される。抵抗値は厚さに逆比例するので24μmの印刷抵抗体が100Ωだとすれば、12μmで印刷されると200Ωの抵抗値をもつことになる。

Fig. 3 Illustration of a 2 square resistor

Fig. 4 Constitution of resistor and terminal

Fig. 5 Comparison of resistor distributions

次に抵抗体形成の寸法は、プリント配線板の銅箔回路の間隔や銅箔の厚さに大きく左右され、またスクリーン印刷での塗布精度がポイントになる。Fig. 4に抵抗体形成の寸法と電極との接触寸法を示した。

4.3 抵抗体の許容差

標準偏差(SD)は抵抗体分布の測定によく使われ、通常の分布抵抗の広がりはその平均値プラスまたはマイナス3つの標準偏差として表すことができる。抵抗体分布を比較するとき、標準偏差は平均値の%として表現されるべきである。これは変動係数またはCVとして知られている。標準偏差(SD)と変動係数(CV)に関する2つの抵抗体の分布比較をFig. 5に示した。

面積抵抗が約20kΩ/□までの抵抗を使ったポリマー抵抗体は±4シグマ(CPK=1.33)で、許容差±20%、約100kΩ/□までの抵抗を使ったPTF抵抗体で±3シグマ(CPK=1.00)で許容差±20%の抵抗体を生産することができる。抵抗体の比率は10%以内に合わせることができる。

4.4 抵抗体の定格電力

ポリマー抵抗体の定格電力は、熱によって起こる受け入れ可能な変動量によって設定される。例えば最大変動-2%を最低限度として設定した場合には、一般的な定格電力は2.4W/cm²（15W/平方インチ）で設定できるが、実際のポリマー抵抗体の電力能力は抵抗体の材質や硬化状態によって熱安定性と基材の熱伝導性が関係する。そのため、1つの抵抗体を設計するには、その最低面積はその抵抗体の実際の消費電力と抵抗体材料の定格電力によって決定される。Fig. 6は各種の電力密度の度合いによるポリマー抵抗体の抵抗値変化を示したものであり、プリント配線板(FR-4)と抵抗体の寸法(1.25mm×1.25mm)の仕様で、2.4W/cm²では温度が<60℃、4W/cm²では<125℃であった。

Fig. 6 Power dissipation of PTF resistors

4.5 抵抗体の電極

ポリマー抵抗体の電極接合部分は、抵抗体の性能と信頼性に最も重要な影響をもつ部分であり、抵抗体の断線、抵抗値の不安定性、電流雑音の増加など障害の大多数は電極部分、あるいはその周辺で起こることが知られている。電気抵抗は、電流の一部をジュール熱に変換することで電流を制限する機能であり、受動素子(LCR)の中で最も発熱する素子である。この素子に電流を供給する電極部分では、良導電体である電極と抵抗体とに理想的なオーミック接合（オームの法則が成立する接合）が必要とされるが、実際には理想的オーミック接合を得ることはむずかしい。すなわち導体と抵抗体との接合面では、導電機構および電気抵抗が著しく異なることから一種のエネルギー障壁が形成され、種々の欠陥が発生することとなる。

次にプリント配線板の銅箔回路をポリマー抵抗体の電極導体として使用する方法も考えられるが、Fig. 7に示すように電極部分を拡大すると、ポリマー抵抗体と銅箔電極部の界面に銅化合物（主に酸化物と水酸化物）の生成が認められる。銅については大気暴露しても化合物を生成するが、ポリマー抵抗体との接触界面では、接触電位差により著しく加速される。銅箔回路をポリマー抵抗体の直接電極材として使用することが困難である理由の大半はこの点にある。

Note) The compound arise at small curvature radius convex area. (Large surface energy)

Fig. 7 PTFR cross section model used Cu-foil as a terminal

接触電位差とは、2種類の異なる物質を接触させた界面ではエネルギー準位の差による電子の移動に基づいて発生する電位差である。

Fig. 8に電極材料の違いによるPTFRの高温放置および加湿放置での特性変化を示す。

電極材料が銅箔の場合では抵抗数値が加湿時間の経過に伴い、少しずつ増加の傾向にある。これは前述説明を実証するもので、抵抗体膜自体の変化でなく、銅箔電極と抵抗体との界面における接触抵抗の問題である。なぜならば銅箔面を貴金属めっき処理（Au・Ag・Ptなど）やポリマー銀導体の電極形成では、安定した特性が得られることから立証される。また高温焼成型導体の銀／パラジウム電極でも同様な結果がでている。

4.6 プリント配線板の大きさと収率（歩留まり）

埋め込み受動部品技術を用いて46cm×51cmサイズのプリント配線板が、95%～98%の抵抗体収率（歩留まり）で現在生産されている。埋め込み受動部品技術を使用するに

Fig. 8 Properties variation of PTFR by difference in terminal materials

Fig. 9 Best and worst-case circuit yields when resistors per circuit=10

際しては、常に注意深い設計と工程管理によって高い収率が達成される。また回路収率、抵抗体密度と配列サイズとの関係は、製品の生産に着手する前に十分考慮すべきポイントである。Fig. 9は、各回路に10個の印刷抵抗体を形成し、その抵抗体の収率を98%目標とした1つの例を示す。

4.7 抵抗体形成のコスト

埋め込み受動部品技術を用いて抵抗体を形成する場合の主な生産コストは、人件費、セットアップ費、インク費用である。埋め込み抵抗体の印刷作業に高価なステンレススクリーン（#325メッシュ）は必要不可欠な備品である。大判サイズでのプリント配線板に均一な形状と安定した膜厚が要求される抵抗体形成にあって、高解像度で5000回の印刷寿命をもち、なおかつ高品質な生産を考えればある程度の価格アップは無視できる。

印刷作業時間は、プリント配線板の大きさ、印刷塗布面積、ポリマー抵抗体材料の粘度によって大きく変わるが、印刷サイズの大小と印刷スピードの代表的関係をFig. 10に示した。Fig. 11はプリント配線板のサイズと抵抗体密度に対する抵抗体コストの概算である。

このコスト概算は、次の前提に基づく材料と人件費に当てはまる。

- 労働費割合 ¥1,400/1時間/1人当たり
- 人員=2
- セットアップ時間=3時間
- 抵抗体サイズ=1mm×1mm
- インク使用量=1平方インチ当たり0.08グラム
- インク価格=1グラム当たり¥60

Fig. 10 Typical rates for manually screen-printed resistors on various sized panels

Fig. 11 Labor and material cost of manufacturing screen-printed resistors

他費用として、抵抗体電極を保護する絶縁材料などの関連費用が追加される。

5. 埋め込み受動部品技術の安定性と信頼性

ポリマー抵抗体の安定性はいくつかの方法によって評価することができる。はんだ付けや高温放置といった耐熱試験や熱衝撃は抵抗値に対し永久的な変化を生むが、湿度や温度変化は一時的に抵抗値が変化するだけである。熱変化に起因する抵抗値変化は1℃に対する変化として統一化されており、ppm/℃として表現される。抵抗体の温度係数(TCR)は温度変化による一時的な抵抗値変化の測定である。TCRは±350ppm以内であるべきで、TCRトラッキングは100ppm以内であるべきである。一般的にポリマー抵抗体は、湿中に暴露すると抵抗値は増加し、高温に暴露すると抵抗値は減少する性質がある。さらに遠距離通信用製品の使用に対しては、±5%以内の信頼性特性が要求される。

Table 1にはプリント配線板の内層回路にポリマー抵抗体を形成した諸特性⁴⁾を示したが、以前より一部に実用化されてきた表面回路に形成した抵抗体膜の諸特性と比較しても、内層回路形成は数段優る信頼性結果となっている。

Table 1. Characteristics of multi-layer PWB with embedded resistor

Characteristics	Glass Epoxy (KMIR 007)			
	100 hr	250 hr	500 hr	1000 hr
Solder Resistance ($\pm 3\sigma$)	—□— (0.4)			
Temperature Properties (+25°C~+100°C)	+0 -6.4			
High Temperature Storage (100°C)	-0.1 -0.9	-0.1 -0.8	-0.4 -0.7	—
Rated Load (70°C)	+0.4 -0.9	-0.6 -0.9	-0.6 -1.1	-0.5 -1.0
Moisture Resistance (40°C-95%RH)	+0.4 +0.2	+0.8 +0.4	+1.4 +1.0	—
Moisture Load (40°C-95%RH)	-0.4 -0.6	+0.1 -0.1	+0.1 +0.2	+0.9 +0.4

(Variation rate: %)

これはオーバーコート材を絶縁被覆(10~20 μm)する表面回路形成と比べ、積層材料で絶縁層が形成される内層回路形成では、外部からの湿度やはんだ付け時に使用されるフラックス成分などの浸透を完全に遮断する効果が大きいと考えられる。しかしポリマー抵抗体と積層材料との収縮作用を十分考慮することが、はんだ耐熱性や熱衝撃性などの性能向上の重要なポイントとなることが前提である。

6. 埋め込み受動部品技術の今後展開と課題

ますます高密度化する部品実装の対応にポリマー抵抗体を用いて表面回路および内層回路に抵抗体を形成する技術は、M社(アメリカ)での商品実用化もあって、今年に入り、熱気を帯びてきている。それらは国内外を問わず世界各国のプリント配線板メーカは元より、電子機器などのセットメーカをも含めた大きな動きへと進展し、技術問い合わせが殺到している状況である。

しかし現在、埋め込み受動部品用のプリント配線板を本格的に生産加工している企業は、世界でも3~4社であるが、今年の後半から来年始めにかけては数十社になると予測される。

今後の課題としては、多量生産化における製造工程の確立と、微小化に対する印刷精度の向上や要求仕様に応じた諸特性のレベルアップがポリマー抵抗体には求められるが、現在、最も開発急務なテーマは電子回路の設計技術である。従来のプリント配線板は、導体回路設計のみのデザインであったが、埋め込み受動部品用のプリント配線板では、R, C, Lを含んだ回路設計技術が求められるからである。

(2003.4.23-受理)

文 献

- 1) J. Savic, et al.: "Embedded Passives Technology Implementation in RF Applications", IPC Printed Circuits Expo, 2002
- 2) 師岡 功: "高密度基板内蔵用抵抗ペーストの開発", 電子材料, pp. 69-73, 2002.9
- 3) Barrie Jones and Isao Morooka: "Guidelines for Successful Implementation of Embedded Passive Technology", IPC Printed Circuits Expo, 2003
- 4) 中村昭春, 斎藤 隆: "高密度印刷抵抗基板", 電子材料, pp. 71-75, 1991.5

用語解説

トンネル効果: Tunnel Effect

半導体の禁止帯の幅が100 Å位に薄くなると、電子流がある確率で通り抜け電流が流れる。これは電子の波動性(波のような性質)によるものである。電位の壁を越えず、トンネルを通して通り抜ける様子に似ていることから、トンネル効果という。

定格電力: Rated Power

抵抗体に電流(A)を一定にして電圧(V)を徐々に上げていき、抵抗体が破壊断線した時点での電流値と電圧値から電力値(W)を算出する。その電力値の80%を定格電力としている。

師岡 功(もろおか いさお)

昭和20年生まれ。昭和39年、東京都立八王子工業高校工業化学科卒業。現在、株式会社アサヒ化学研究所において、EPD技術に使用されるPTF材料の開発に従事。

原崎 一彦(はらさき かずひこ)

昭和40年生まれ。昭和63年、工学院大学工業化学科卒業。株式会社アサヒ化学研究所開発本部勤務。機能性材料(PTF)の研究開発に携わり、現在、導電ペーストの開発に従事。

榎戸 政文(えのきど まさふみ)

昭和44年生まれ。昭和63年、東京都立多摩工業高校工業化学科卒業。株式会社アサヒ化学研究所勤務。機能性材料(PTF)の研究開発に携わり、はんだ代替用導電接着剤などを開発。現在、販売本部において、機能性材料のセールスエンジニアとして従事。

Barrie JONES

1943年生まれ。英国で電気工学士の称号をとり、2002年までPolymoer社(米国)勤務。その間に、PTF材料を使用した電子部品を完成させる。1996~1999年、Motorola社とのEPDに関する共同開発に従事。現在、株式会社アサヒ化学研究所米国スタッフ。