2. 多層プリント配線板の将来の材料

Future Materials for Multilayer Printed Wiring Boards.

2.1 緒 言

藤 平 正 気*
Masaki FUJIHIRA*

* 三菱瓦斯化学株式会社本社研究所

* Central Research Laboratory, Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc.

2.1.1 背 景¹⁾

エレクトロニクス産業に対する時代の要望は、軽薄短小速安である。したがって、高度情報化社会への具体的な展開を支える電子機器の、高密度、高精度、そして高信頼性化は、半導体の高集積度技術と、その高密度、高精度実装技術を無視して語ることはできない。このような技術革新は、電子機器に組み込まれるプリント配線板（以下PWB）に対しても大きな影響を与えており、PWBのX、Y軸方向に関する高密度表面実装ないしはファインライン化指向、Z軸方向に関する小径穴導通ないしは多層化指向が顕著である。ここでは、多層プリント配線板（ML-PWB）用材料に対する要求特性と目標値、および、その本流材料であるガラス布基材エポキシ樹脂銅張積層板（FR4-CCL）の実力値、そして、これらのギャップを埋める技術展開を解説することで、ML-PWBの将来の材料を紹介したい。

2.1.2 要求特性^{2),3),4)}

細線化に対するパターン形成技術の量産限界、電気特性に対する機能や信頼性の確保から、ML-PWBを採用する高密度設計は、部品配置や結線のAI技術、完全自動化に支援されて進展するであろう。従来、FR4-CCLは、4～8層PWBに対しバ

ランスのとれた性能を発揮する複合材料なので、コンピュータ等の電子機器で高い採用実績を維持してきた。これは、PWBの製造プロセス、部品の実装方式、電子機器の用途、さらには、耐熱性・寸法安定性・穴あけ加工性・電気絶縁性等の信頼性確保から、複雑多様化してきた要望に対処できた成果と考えられる。しかし、表2.1に示すように、10層以上のPWBで、時代の要求に対し実力不足が目立つのも事実である。したがって、樹脂だけでなく、基材、場合によっては、銅はくも含む構成要素の各種特性を考察し、材料の複合化を図る必要がある。

2.1.3 アプローチ^{5),6),7)}

表2.1で掲げた各要求特性から、高耐熱性、低誘電特性、高電気絶縁性に対するアプローチを以下に概説する。

2.1.3.1 高耐熱性

高耐熱性は、表2.2に示すように、高ガラス転移温度（ T_g ）、高寸法安定性の目安となる低熱膨張係数等で代表される。

PWBの配線加工から部品実装までの一連の製造工程で、材料は、種々の熱履歴を経ることになる。特に、はんだスルーホールめっき後のIRフュージング、銅スルーホールめっき後のはんだコーティング、挿入実装部品のフローソルダーリング、表面実装部品のIRリフローソルダーリング等でのヒートショックは、有機化合物材料にとって過酷である。なお、吸湿率の高い材料は、ヒートショックを受けたとき、ディラミネーション等の重大欠陥を誘発しやすい。したがって、吸湿率とはんだ熔融処理方法および条件との関係を理解した工程管理のほか、材料の耐湿性や耐薬品性を改善することも重要である。

さらに、ML-PWBの穴あけ加工時、ドリルビットの回転および送り速度を高くするほど、材料との摩擦で発熱が大きくなる。これにより、樹脂切粉

が軟化熔融状態となり、内層銅はくのはく断面に付着して薄い電気絶縁層を形成する。スミアと称し、層間接続の信頼性を低下させる。したがって、穴あけ加工方法および条件の最適化のほか、切削発熱で軟化しない耐熱性が必要となる。

また、FR4-CCCLの熱膨張係数は、Z軸方向が 10^{-4} 1/℃、ガラス布に制御されているX、Y軸方向が 10^{-5} 1/℃で、通常1桁の差がある。これに対し、スルーホールめっきされた銅の熱膨張係数は、通常 10^{-5} 1/℃である。つまり、ML-PWBがヒートショックを受けたとき、Z軸方向に関し、樹脂の熱膨

張収縮に銅が追従できないとクラックが発生し、層間接続の信頼性を低下させる。したがって、広い温度範囲で低熱膨張係数を維持するため、Tg がより高い樹脂を採用する必要がある。

一方、昨今、部品をPWCへ高密度実装するため、部品の軽薄短小化を可能にする表面実装技術（SMT）の進展が目覚ましい。リードレスセラミックチップキャリヤやベアLSIチップのダイレクトボンディングでは、PWBのX、Y軸方向に対する熱膨張係数を、アルミナセラミックやシリコンチップの 10^{-6} 1/℃と整合させないと、熱膨張収縮によりは

表 2.1 10層以上のML-PWB用材料に対する要求値とFR4-CCCLの実力値

要 求 特 性	FR4-CCCLの実力値	要 求 値	ア プ ロ ー チ
高 耐 熱 性 Tg [℃]	140～160	(スミアレス、表面実装) 180 以上	多官能エポキシ樹脂、 BTレジン、ポリイミド 等
低熱膨張係数 [PPM/℃] { 25℃～Tg }	X, Y : 20～ 40 Z : 80～200	(ダイレクトボンディング、 PTHと内層銅の接続信頼性) X, Y方向 : 4～ 8 Z方向 : 40～80	アラミド布エポキシ樹脂、 (石英)ガラス布ポリイミド 等
低 誘 電 率 { 1 MHz }	4.0～5.0	(高速演算) 3.0～4.0 以下	変性BTレジン、(変性)フッ素樹脂、 Dガラスあるいは石英ガラス布 等
低 誘 電 正 接 { 10 GHz }	0.013～0.018	(高周波数領域伝送) 0.0015～0.0030 以下	変性BTレジン、ポリブタジエン、 PPE、フッ素樹脂、 セラミック 等
高電気絶縁性		(高密度配線) 耐銅マイグレーション性	BTレジン、ポリイミド 等
高 熱 伝 導 性		(熱放散) 金属と同程度	金属張、金属コア(銅/ インバー/ 銅) 等

表 2.2 高耐熱性および低誘電特性へのアプローチ材料

		耐熱性 { 25℃～Tg }			誘 電 特 性			
		Tg [℃]	熱膨張係数 [PPM/℃]		誘電率	誘電正接 [×10 ⁻⁴]		
			X, Y 軸方向	Z 軸方向	[1 MHz]	[1 MHz]	[1 GHz]	[12 GHz]
基 材	ガラス繊維布 Q (石英)	1670*	0.5		3.9	2		
	D	770*	3.2		4.7	9		
	E	840*	4.5		7.2	11		
	樹脂繊維布 アラミド		-3.5		3.4	70		
	セラミック アルミナ		6.5	6.5	6.0	10		
銅	銅はく & めっき銅	1080*	5～20					
複合材料	Eガラス布エポキシ樹脂(FR4)	140～160	13～18	60～90	4.6～5.0	130～180		
	Eガラス布BTレジン	180～260	13～16	50～80	4.1～4.7	40～ 80		
	Dガラス布変性BTレジン	180～240			3.3～3.7	10～ 20		
	Eガラス布ポリイミド	180～260	13～16	50～80	4.5～4.8	120～150		
	Qガラス布ポリイミド	180～260	6～ 8	50～70	3.4～3.6	30～ 50		
	アラミド布ポリイミド	180～260	5～ 8	50～70	3.4～3.6	60～100		
	Eガラス布フッ素樹脂	(170～260)			2.4～2.8	10～ 15	15～25	25～40

* 各種ガラスおよび銅の軟化温度を示す。

んだ接合部やチップにクラックが発生し、導通不良となる心配がある。したがって、Tgがより高い樹脂と、熱膨張係数がより小さいガラス布やアラミド布等を組み合わせ、FR4-CCLのX、Y軸方向の熱膨張係数 10^{-5} 1/°Cを1桁小さくする必要がある。

2.1.3.2 低誘電特性

誘電特性は、誘電率 (ϵ) と誘電正接 ($\tan \delta$) で代表される。コンピュータの高速演算性を向上させるため、低誘電率高多層プリント配線板材料が要望される。衛星放送、衛星通信あるいは移動無線への用途に対し、GHz帯のSHF領域で伝送損失を小さくできる材料、つまり、低誘電正接材料が要望されている。

低 ϵ と低 $\tan \delta$ の必要性について、式(1)と式(2)で表現した。電気信号の高速伝送および電磁波の減衰低減を理解できる。

$$v = k_1 \times 1/\tau = k_1 \times C/\sqrt{\epsilon} \dots\dots\dots(1)$$

- ただし v : 伝送速度 [cm/sec]
- τ : 遅延時間 [sec]
- C : 光の速度 [3×10^{10} cm/sec]
- ϵ : 誘電率
- $A = k_2 \times (1/C) \times f \times \sqrt{\epsilon} \times \tan \delta \dots\dots\dots(2)$
- ただし A : 減衰 [db/cm]
- f : 周波数 [cycle/sec]
- $\tan \delta$: 誘電正接

また、表 2.2 で各種材料の ϵ 、 $\tan \delta$ を示したが、おおむね、有機材料では低 ϵ と低 $\tan \delta$ が密接な関係にあるといえる。分子構造から判断すると、対称で、極性基がなく分極にくい化合物から選択することになる。フッ素樹脂がよく話題になるが、銅はくや基材に対する接着力、樹脂同士の密着性を改善する必要がある。

特に、高多層プリント配線板材料に対しては、基材であるガラス布も低 ϵ 化し、かつ、ML-PWBの総合的な性能バランスも配慮して高信頼性を確保することが重要になる。したがって、 ϵ は、3.5～4.0程度であるが、ポリイミド系樹脂を採用することになる。

2.1.3.3 高電気絶縁性

高密度化の要請により、信号線幅や間隔が狭くなり、小径穴導通の採用で穴間隔も狭く、クリアラン

スホール径も小さくなっている。

つまり、ピン間3本以上の設計により、信号線間隔は150 μ m 以下となり、エッチング精度を上げる工夫のほか、5～10 μ m 厚の極薄銅はくやマット面の凹凸が小さいロープロファイル銅はくを採用する必要がある。さらに、表層では、樹脂コーティングにより絶縁性の向上を図り、内層では、パターンや穴位置精度の向上、良好な穴内壁状態を得る穴あけ加工性の改善、ボイドレス多層化成形により所定の絶縁距離を確保する必要がある。

したがって、金属をイオン化する不純物を材料から除去すること、樹脂と基材の密着性を向上させること、耐湿性の高い樹脂を採用すること等が重要となる。

2.1.4 ま と め

以上、ML-PWBの高性能化は、各要求特性の総合的なバランスを勘案して達成される。本章では、高耐熱性、低誘電特性への対応を中心に各種有望材料の紹介がある。したがって、熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂あるいは無機化合物と、異なる出発材料からの高多層化技術動向を理解していただけるものと思う。

文 献

- 1) '84&'89電子工業年鑑、通産省機械情報産業局編、電波新聞社 (1984 & 1989)
- 2) JPCA編・発行、プリント配線板の多層化動向調査報告書 (1984.3.)
- 3) JPCA編・発行、プリント回路工業の中・長期展望調査報告書 (1987.2.)
- 4) Gaku et al.: "Epoxy Resin Modified Bismaleimide Triazine Resin", 2nd SPSJ International Polymer Conference/IPC '86, 2B09, 86 (Aug. 1986)
- 5) 藤森: "多層プリント配線板の製造・品質管理・技術管理", GTCセミナー講演要旨 (1986.11.)
- 6) 三菱瓦斯化学: "ガラス布基材BT樹脂・多層プリント配線板用材料", 技術資料 (1988)
- 7) 佐久本: "プリント配線板用高分子材料", 電子材料, 27 (12), 62 (1988)

2.2 低誘電特性材料の動向

岳 杜夫*
Morio GAKU*

* 三菱瓦斯化学株式会社電子材料事業本部

* Electronics Material Div., Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc.

2.2.1 はじめに

ガラス布エポキシ樹脂積層板（FR-4）は、プリント配線板に使われてから、すでに25年以上を経過する。いうまでもなく、銅張積層板などを用いて作られるプリント配線板は、半導体等の電子部品を搭載、実装する用途に使われるものであり、この長期間、目ざましい半導体の技術革新からくる実装方式の変革、それに伴うプリント配線板製造面からの新規な要求に対し、個々の特性では、FR-4より優れた特性の材料が出現したにもかかわらず、現在もなお、積層材料の主流の座を保持していることは、この材料の優れた特性バランスによるものである。

つまり、現在のプリント配線板の設計、製造方式を前提とした場合、新たな特性要求に対しては、FR-4の作業性や特性バランスが基準とならざるをえない。そして、現在、表面実装やチップオンボード化によるプリント配線板の高密度化対応が急速に進行中である。さらに、高速CPUの実装に用いる多層プリント配線板には、FR-4より低誘電率で、目標としては3.0以下の誘電率、0.0030以下の低誘電正接の積層材料が要望されている。

この特性は、FR-4を構成するEガラス布や汎用エポキシ樹脂の実力を越えるものであるため、数多くの新しい積層板が提案されている。各々に長所短所があり、新材料の定着までに、まだ少し時間が必要とすると思われるが、ここに、これらの積層材料について解説する。

2.2.2 低誘電率、低誘電正接化

積層板の誘電率は、通常、誘電体（絶縁体）の誘

電率と真空の誘電率の比、つまり比誘電率をいう。つまり、真空の誘電率を1とした場合の相対値であり、したがって、真空または空気を絶縁に使えるばよいのであるが、プリント配線板では、配線や部品をサポートするために絶縁体を使用する必要があり、この絶縁体の誘電特性の低下が技術的挑戦課題となる。

誘電体の誘電率は、そこに電界が加わったときの誘電分極の大きさによるものである。誘電分極にはいくつかあるが、最も高周波の領域では、基材と樹脂間など、異なる物質の境界面に電荷がたまり、分極する、いわゆる「界面分極」の影響が大きく、やや低い周波数領域では、極性基をもつ物質の双極子の回転による分極、いわゆる「双極子分極」の影響が大きな要因となる。

また、双極子分極が交流電界において、電界が交互に変化するにつれて、分極も交互に変化し、この際の内部摩擦により、誘電正接が増加する。

樹脂だけで作られた配線板材料以外の一般的な積層板は、複合材料であるため、低誘電率化には、双極子分極を小さくする検討が主体となる。そして、高温では、分子が動きやすくなるため、樹脂の耐熱性や、吸湿の影響も考慮されなければならない。

誘電特性を重視する配線板は、大別して無線機器用とコンピュータ用に分類できる。

衛星通信や衛星放送に代表される機器のマイクロ波回路板では、信号の誘電損失が最も大きな問題である。

誘電損失（ α : dB/in）は、

$$\alpha = (27.3 \times \frac{f}{C}) \times \sqrt{\epsilon} \times \tan \delta \cdots \cdots (1)$$

C : 光速 f : 周波数 (GHz)

の関係があり、高周波領域では、誘電率より、誘電正接の大小が誘電損失の大きさを左右する。

一方、高速コンピュータでは、プリント配線板の配線長も長く、半導体の演算速度に追従するため、配線における信号伝搬の遅延を少なくする必要がある。信号伝搬遅延（ T_d : psec/mm）は、

$$T_d = 3.33 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \cdots \cdots (2)$$

ϵ_{eff} : 実効誘電率

の関係があり、誘電率が小さいほど伝搬速度が速く

なる。また、低誘電率化は、クロストークの減少、ライン幅の細線化、板厚を薄くできるなどの効果がある。そして、誘電率と誘電正接の積は、パルスのライズタイムデグラデーションに関連し、低誘電正接であることも要求される。

2.2.3 低誘電特性材料

アディティブ法にしる、銅はくを使う方法にしる、回路導体が絶縁体上に形成されている形のプリント配線板に用いる絶縁体の種類は、次の3種に分類される。

- ・樹脂が補強基材に含浸された形の積層板
- ・充てん剤入り樹脂で作られた絶縁体
- ・樹脂のみで作られた絶縁体

このほかにも、絶縁体内に気泡や中空球などの方法で空気を導入したものや、加熱で成形できるプラスチック繊維と非溶融繊維で補強基材を作り、これを加熱加圧で一体化して絶縁体とする方法も知られている。

そして、樹脂としては、次の3種に分類される。

- ・熱硬化性樹脂
- ・熱可塑性樹脂（異種プラスチックを混合するポリマーアロイを含む）
- ・I P N，セミI P N（熱硬化性樹脂／熱可塑性樹脂の混合）

図 2.1 樹脂の誘電特性（1 MHz，25℃）

補強基材の形状は、織布、不織布、シート等があり、また材料としては、有機繊維、無機繊維、そしてこれらの混合または併用などがある。

図 2.1 は、代表的な熱可塑性および熱硬化性樹脂の誘電特性であり、図 2.2 は、代表的な補強基材の誘電特性を表したものである。

樹脂の誘電率は、比較的測定が容易であるため、文献値と実測値に大差がない場合が多いが、特に繊維状の補強基材は、それ自体の値を測定することが困難なこともあって、文献によって大幅に値が異なり、図では、範囲をもって表示した。

これらの材料を組み合わせることにより、理論上、

図 2.2 基材の誘電特性（1 MHz，25℃）

図 2.3 積層板の樹脂量と誘電率の関係（1 MHz，25℃）

非常に多種類の絶縁体を作ることができる。しかし、前述のように、プリント配線板の加工上、部品の実装時、そして配線板の電気的特性のすべての特性バランスをとることは、必ずしも容易ではない。

一方、積層材料の誘電率は、構成している樹脂と基材等の、各々の値の体積比で概算できる。図 2.3 は、誘電率 3.1 の樹脂と、E ガラス布の誘電率を 6.2 として計算した値と、実際に樹脂量の異なる積層板を作り測定した値との比較である。双方の差は、界面分極によるものか、E ガラス布の値が違っているのか不明である。Dr. Newton¹⁾は、より近似式として、式(3)を提案している。

$$\epsilon_{r'lam} = \frac{V_{rsn} \cdot \epsilon_{r'rsn} \cdot \left\{ \frac{2}{3} + \frac{\epsilon_{r'rnf}}{3 \cdot \epsilon_{r'rsn}} \right\} + V_{rnf} \cdot \epsilon_{r'rnf}}{V_{rsn} \cdot \left\{ \frac{2}{3} + \frac{\epsilon_{r'rnf}}{3 \cdot \epsilon_{r'rsn}} \right\} + V_{rnf}} \dots\dots\dots (3)$$

$\epsilon_{r'lam}$: 積層板の誘電率 V_{rnf} : 基材の体積割合
 $\epsilon_{r'rnf}$: 基材の誘電率 V_{rsn} : 樹脂の体積割合
 $\epsilon_{r'rsn}$: 樹脂の誘電率

通常のガラスエポキシ積層板の樹脂分の体積％は約60～67％である。つまり、エポキシ樹脂にかえて、E ガラス布と組み合わせて、誘電率 3.0 以下の積層板を作るためには、この式で計算すると、誘電率 2.1 以下の樹脂を使用するか、または低誘電率の樹脂を使い樹脂量を多くした積層板を作るしかない。また、樹脂量の違いによる誘電特性の違いは、多層プリント配線板内の各層の誘電率のばらつきにも影響するものである。

2.2.3.1 フッ素樹脂を用いた積層板

ガラス布基材 4 フッ化エチレン樹脂 (PTFE) 積層板は、1975年にM I L規格に規定され、高周波用配線板として使用されている。この積層板の誘電特性例を図 2.4 に示す。

PTFEを代表とするフッ素樹脂は、耐熱性、耐湿性、耐薬品性、耐燃性に優れた低誘電率樹脂であり、接着性や寸法安定性に難点はあるものの、低誘電特性の積層板材料として使用される。

積層板材料へのフッ素樹脂使用例は、次にあげる例のように非常に多岐にわたっている。PTFE粉末や繊維を約38重量％、エポキシ樹脂に混合し、ガ

ラス不織布と組み合わせて、誘電率 3.1 の板を作る (特開昭63- 159442, 同63-154748等)、フッ素樹脂オルガノゾルをB T レジンに混合し、樹脂量88％のE ガラス布プリプレグで誘電率 2.8 の板を作る (特開昭63-179738) 等の方法に見られる、熱硬化性樹脂の充てん剤に使う方法。

P T F E 繊維織布にB T レジンを含浸して板を作る (特開昭55- 137), 同不織布とエポキシ樹脂により、誘電率 2.9 の板を作る (特開昭63-162731 等) 等に見られる、フッ素繊維を補強基材として熱硬化性樹脂と組み合わせる方法。

多孔質のP T F E シートに金属蒸着し、誘電率 1.3 ～ 1.6 の絶縁体とする (特開昭63- 244794), 同シートにB T レジンやポリイミド、エポキシ樹脂を含浸して板を作る(特開昭62-283693, 62-283694 等), 同シートの両側にプラスチックフィルムを介して銅層を設け、誘電率 2.4 の材料を作る (特開昭63-248196) などに見られる、P T F E 多孔質シートを応用する方法。

また、Arthur²⁾は、P T F E とガラス繊維とセラミック繊維を複合化し、誘電率 2.8, 誘電正接 0.0014 の積層材料を発表している。

図 2.4 ガラス布 PTFE 板の誘電特性例

表 2.3 PTFEを用いた積層板の誘電特性例

積 層 板	誘 電 率	誘電正接
ガラス布 / PTFE	2.3～2.8	0.0008～0.0020
RO 2800 ²⁾	2.8	0.0020
アラミド繊維 / PTFE	2.2～2.5	
Gore-Ply TM /エポキシ ³⁾	2.6～2.8	
PTFE 布 / BTレジン	2.5～2.8	0.0008

表 2.3 は、これらの材料の誘電特性であるが、各々の材料間に、多層化接着温度と接着力、孔内へのめっき前処理方法、寸法安定性、強度などで大幅な違いがある。Mosko³⁾ は、多孔質 PTFE 繊維織布基材熱硬化性樹脂プリプレグとガラス布熱硬化性樹脂銅張板中間層とによる「ハイブリッドマルチ」方式も紹介しており、例えば、ライズタイム 200psec のパルスを入力、長さ 1.2 m の配線の出力では、FR-4 の 409psec のライズタイムデグラデーションに対し、7～32% の改善があったとしている。

2.2.3.2 炭化水素樹脂を用いた積層板

極性基の少ない、熱硬化性ポリブタジエンやスチレン共重合体を用いて、低誘電特性積層板を作る方法がある。例えば、高分子量 1,2 ポリブタジエン / E ガラス布で誘電率 3.0～3.4 の板を作る（特開昭62-288639）、1,2 ポリブタジエンに中空ガラス球を混ぜて、誘電率 2.3 の樹脂を作る（同63-173633）、ビス（シクロペンタジエン）化合物とマレイミドで誘電率 2.7 の樹脂を作る（同61-255916）、ポリ（p-ヒドロキシスチレン）誘導体とポリブタジエン類で、誘電率 3～4 の樹脂を作る（同63-117053 など）方法がある。無線機器の絶縁材料として、網状化ポリスチレンが使用されているが、一般に非極性の炭化水素樹脂は接着性に劣り、実用化には、この欠点をどのように解決するかがポイントであろう。

2.2.3.3 シアネート樹脂（トリアジン樹脂・BTレジン）を用いた積層板

—O—C≡N（シアネート基）を有する化合物は、加熱により、トリアジン環を形成し、耐熱性と電気絶縁性に優れ、極性基をほとんど有しないため、低誘電率、低誘電正接で、金属マイグレーションの発生しにくい熱硬化性樹脂として知られている。BTレジンは、三菱瓦斯化学の変性シアネート樹脂の総称であり、そのガラス布基材積層板は、半導体チッ

ブオンボード用や高周波回路板用として広く実用されている。シアネート樹脂の誘電特性は、その骨格の分子構造により多少異なるが、最も一般的なビスフェノール A 型シアネート樹脂の硬化物は、誘電率 3.1、誘電正接 0.0030、ガラス転移温度 250℃ の特性を有する。

シアネート樹脂のより低誘電率化には、ポリフェニレンエーテル（PPO または PPE）で変性する方法（USP 4503186 等）、1,2 ポリブタジエン / スチレンコポリマー変性（特開昭61-233060 等）、フッ素樹脂粉の混合（特公昭57-61779 等）など低誘電率の熱可塑性樹脂との IPN 化や、低誘電率化合物との混合などの方法がある。図 2.5 に、耐燃化された低誘電率の BTレジン、BT 2060 BH 樹脂単独の硬化物の誘電特性を、また、図 2.6 に、これと D ガラス布を組み合わせた積層板の誘電特性の周波数および温度依存性を示した。そして、図 2.7 に、E ガラス、D ガラス、石英およびアラミド織布を用いた場合の誘電率を示した。表 2.4 は、銅張積層板の一般特性例である。

ビスフェノール A 型シアネート樹脂（式(4)）のほかに、式(5)、式(6)等の新しいシアネート樹脂が知ら

図 2.5 硬化樹脂の誘電特性例（周波数依存性）（25℃）

れている。

2.2.3.4 補強基材を使わない方法

アディティブ法が開発された頃から、基体を選択的に熱硬化性樹脂層を設け、ついで無電解めっきし、これを繰り返すことにより多層板を作る「ビルドアップ法」が知られているが、近年、ガラス布の誘電率が樹脂に比べて高いことから、低誘電率多層板の製法の1つとして再度注目を集めている。

Nelson⁶⁾は、高速演算のGaAs 半導体（ライズタイム 100psec 以下）の実装に、誘電率3.8、誘電正接0.0100のポリイミド樹脂と無電解めっきとの繰り返しで立体回路のプリント配線板を作る方法を発

図 2.6 BT2060BH/D ガラス布積層板の誘電特性

表している。このような用途にも、図 2.1 のような各種樹脂や、より低誘電率高耐熱高接着性の樹脂や紫外線硬化型等が適しており、光硬化性のポリイミド樹脂やBT レジンなどもある。

また、プラスチック発泡体を絶縁材料として使う（特開昭62-69580）方法、ポリイミド酸を銅はく

図 2.7 BT2060BH/各種基材積層板の誘電率（樹脂量45wt%）

表 2.4 銅張積層板の一般特性例

項 目	処理条件	Dガラス布 BT2060BH	アラミド布 BT2060BH	Eガラス布 B M I 系 ポリイミド
体積抵抗率 (Ω・cm)	C-96/40/90	5 × 10 ¹⁴	1 × 10 ¹⁵	2 × 10 ¹⁵
吸 水 率 (%)	E-24/50 + D-24/23	0.08	0.20	0.25
はんだ耐熱性 (秒)	at 300 °C	120 以上	120 以上	120 以上
耐塩化メチレン性	23 °C 20分浸漬	異常なし	異常なし	異常なし
銅はく引きはかり強さ (1oz) (kg/cm)	A	1.7	1.7	1.7
曲げ強さ (kg/mm ²)	A	35	40	55
ガラス転移温度 (°C)	A	220	210	240
誘 電 率 (1MHz)	C-96/20/65	3.5	3.3	4.6
誘 電 正 接 (1MHz)	C-96/20/65	0.0016	0.0070	0.0070

キシ樹脂に空隙を形成するポリカプロラクトンを混合し硬化する(同63-95696)など、樹脂中に気泡を導入して低誘電率化する方法もある。

さらには、多層プリント板の各層間を空気絶縁する方法(同63-53997)など、多層板の構成上に工夫をこらす低誘電率化の方法もある。

耐熱性エンジニアリングプラスチックやそのポリマーアロイも比較的 low誘電率であり、射出成形プリント配線板材料として使われるが、一般には、ガラス繊維などを充てんした樹脂が使われるため、その分だけ誘電率が高くなる。

2.2.4 まとめ

以上、解説したように、低誘電特性の配線材料の実用化に向けて、各方面からのアプローチが続いている。しかしながら、配線板を構成する板状の誘電体の高周波特性試験方法は、ASTM D3380 や D2520 があるだけで、積層板自体の誘電特性を広範囲の高周波領域で測定する方法が規格化されていない。誘電特性は、測定方法や、板厚などの試験片の形状によってかなり値が異なり、また、試験片の吸湿状態や温度によっても異なる。ここに記載した誘電率や誘電正接も、各々異なる条件で測定されたものであり、その材料による絶対値を単に比較するのは適当でなく、材料の選択を難しくしている原因の1つである。

また、各材料の誘電特性以外の特性や加工性、経済性の比較も、いまだ情報量も少なく明確でないが、電子機器メーカーでの評価が進むにつれ、要求特性がより鮮明化し、またプリント配線板の製造プロセスの革新も含め、高性能半導体を実装するためのプリント配線板材料も、より明確になってくるものと思われる。

文 献

- 1) T.D.Newton: "Predicting Dielectric Properties", IPC 29th Annual Meeting, (IPC-TP-587), Apr., 1986
- 2) D.J.Arthur: "Electrical and Mechanical Characteristics of Low Dielectric Constant Printed Wiring Boards": IPC Technical Re-

view, May, 1986

- 3) J.C.Mosko and W.L.Gore & Associates, Inc.: "Gore-PlyTM Pre-Pregs and Gole-CladTM Laminates", 1988 (Gore 社資料)
- 4) G.W.Bogan, M.E.Lyssy, G.A.Monnerat, E.P.Woo: "Unique Poly Aromatic Cyanate Ester for Low Dielectric Printed Circuit Boards", Sampe Journal, Vol.24, No.6, 11th, Dec., 1988
- 5) D.A.Shimp: "Thermal Performance of Cyanate Functional Thermosetting Resins", 32nd International SAMPE Symposium/Exhibition, Apr., 1987
- 6) L.Nelson: "Success of GaAs Semiconductors Hinges on Packaging", Electronic Packaging & Production, pp.48-51, Jun., 1985

フッ素樹脂材料を中心とした

2.3 低誘電特性材料の動向

藤 川 彰 司*

Shoji FUJIKAWA*

* 松下電工株式会社電子基材事業部

* Electronic Materials Div., Matsushita Electric Works Ltd.

2.3.1 まえがき

最近の高度情報化社会の進展により、処理される情報量が飛躍的に増大した結果、多量の情報をより高速演算処理することが求められている。現在、大型高速コンピュータに使用されている多層プリント配線板は、すでに最高で42層があるように、高多層高密度化が実現され、信号回路そのものの短縮化による高速化が図られている¹⁾。

さらに、最近、機器に使用される周波数が高くなるとともに、実装される素子の高速化が進み、素子自身の高速性能を最大限に発揮させることが、高速演算処理のために、重要不可欠となってきた²⁾(図2.8)。すなわち、多層プリント配線板の高密度

ECL, GaAs など高速デバイスを用いる場合、システム遅延を起こす要因の50%以上は、プリント配線材料、実装および配線接続に起因する。

図 2.8

化、および素子の高速化が進展した現在、プリント配線板材料の面から、少しでも信号の高速化に貢献すべく方策が望まれている。それに応えるためには、プリント配線板材料の低誘電率化は非常に有効な方策の1つである。

そこで、以下、低誘電率化による効果や、多層用低誘電率材料の動向について述べる。

2.3.2 低誘電率化による効果

2.3.2.1 信号遅延の減少(信号の高速化)

一般に、プリント配線板上の導体内を流れる信号の速度は、以下の式で表される。

$$V_p = C / \sqrt{\epsilon} \quad \text{m/sec}$$

V_p : 信号伝搬速度

C : 光速度

ϵ : 材料誘電率

上記式より、信号の速度は、プリント配線板材料の誘電率(ϵ)が低ければ低いほど、高速となる。

表 2.5 に、代表的低誘電率材料であるガラス基材フッ素樹脂材料とガラス基材エポキシ樹脂材料との信号伝送速度の比較を示す。

2.3.2.2 板厚の低減(薄形化)

プリント配線板材料の誘電率(ϵ)と特性インピーダンスとの関係を、図 2.9 で示す。図 2.9 より、同一インピーダンス設計を行う場合、誘電率の低い材料を用いれば、板厚(h)を薄くすることができる。すなわち、多層プリント配線板の総厚みを減少

表 2.5 材料と信号伝送速度

	誘電率	信号伝送速度
ガラス基材フッ素樹脂 (R4737M)	2.6	(相対比較) 137
ガラス基材エポキシ樹脂 (R1766)	4.9	100

インピーダンス計算式

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon'}} \ln \frac{4h}{0.567w + 0.67t}$$

(Z_0 : 特性インピーダンス)
 w : 信号導体幅
 t : 信号導体厚さ
 h : 誘電体厚さ
 ϵ' : 材料比誘電率

インピーダンス測定試料

図 2.9 インピーダンス特性

させることができ、垂直方向での信号距離短縮にも有効である。

2.3.2.3 クロストークの低減

クロストークは、信号の伝搬している配線から近接している別の配線へ、配線間の電磁結合と静電結合により誘導される一種のノイズ現象であり、高速デジタル回路にとってはできる限り低減させておくことが望ましい。このクロストークを低減させるのに配線板材料の低誘電率化が有効であることが、最近の文献でも確認されている^{3),4)}。

表 2.6 各種樹脂の誘電特性

樹脂の種類	ϵ (1MHz)	$\tan \delta$ (1MHz)
ポリ四フ化エチレン(テフロン)PTFE	2.1	0.0002
ポリブタジエン	2.3	0.0013
ポリフェニレンオキサイド(P.P.O)	2.6	0.0020
ポリイミド	3.4	0.0070
エポキシ	4.5	0.0120

表 2.7 各種基材の誘電特性

基材の種類	ϵ (1MHz)	$\tan \delta$ (1MHz)
ガラス繊維	Eガラス	6.3
	Dガラス	4.2
クウォーツ繊維	3.7	0.00015
アラミド繊維	3.8	—

表 2.8 ガラスフッ素樹脂マルチ

品番	R-4737M	R-4637M	R-4537M
内 容	内層材	プリプレグ	フィルム
厚 さ	最小 0.1	0.04	0.03
銅 はく厚さ (mm)	0.018 0.035 0.070	—	—
サイ ズ (mm × mm)	最大 600 × 500	最大 600 × 500	最大 600 × 500
U L 規 格	94 V-0	94 V-0	94 V-0

(注) サフィックスMはマルチ材料を意味する。

2.3.3 低誘電率多層プリント配線板材料の開発動向

一般のプリント配線板材料と同様に、多層用低誘電率材料の場合もそのほとんどが樹脂と基材より構成されている。したがって、低誘電率化を狙う方法として、樹脂および基材からのアプローチが行われている。参考として、種々検討されている基本樹脂と基材を表 2.6、表 2.7 で示した。

次に、代表的な低誘電率多層プリント配線板材料を紹介する。

2.3.3.1 ガラス基材フッ素樹脂材料

フッ素樹脂は、有機材料の中で最も誘電率が低い ($\epsilon = 2.1$) ことから、多層用材料として以前より種々検討されていたが、フッ素樹脂が熱可塑性であるため、高密度高精度な多層化は、寸法安定性に欠けるため実用化は困難とみなされていた。

しかし、多層時に用いる材料 (表 2.8)、および材料の組み合わせ方法に工夫をこらすとともに (図 2.10)、2次積層成型条件の最適化を図ることにより

図 2.10 6層組み合わせ構成

図 2.11 フッ素樹脂マルチの2次成型条件例

表 2.9 各種多層配線板の2次成型温度

多層配線板材料	2次成型温度(℃)
エポキシマルチ	170
ポリイミドマルチ	200
フッ素樹脂マルチ	350~380

(図 2.11、表 2.9)、従来のフッ素樹脂材料に比べ、寸法変化率を1/2以下に抑えられている。

また、フッ素系材料はドリル穴あけ時に、切削バリがドリルに巻きつくという技術的課題があったが、これも材料および穴あけ条件の改善により(表 2.10)、ガラスエポキシ材(FR-4)に匹敵する加工が可能となっている(図 2.12)。

次に、多層板としてのスルーホール信頼性について紹介する。フッ素樹脂はもともと非粘着性樹脂であるので、2次積層成型後の多層プリント配線板の層間密着を強固にするための技術的工夫が必要である。

図 2.13に示している方法で、スルーホール間の電気絶縁性を評価した結果が図 2.14、2.15である。す

表 2.10 ドリル加工性

サ ン プ ル	6 層板 (板厚 1.4 mm)	
ド リ ル 径	0.9 ϕ	
ド リ ル 条 件	形 状	アンダーカットタイプ
	回 転 数	60000 回転/分
	送り速度	3 m/分 (50 μ /rev.)
スルーホールの内壁粗さ	MAX 20 μ m

図 2.12 6 層板スルーホール部断面

図 2.13 スルーホール間の電気絶縁性、測定方法

なわち、フッ素樹脂多層プリント配線板は、煮沸処理および高温加湿処理条件において、他の一般材料（ガラスエポキシ材など）に比較し、同等以上の電気絶縁性が確保されている。

すでに、このガラス基材フッ素樹脂材料は、多層配線板として、通信機器、計測機器等で実用化されており、今後、大型高速コンピュータをはじめとする高速演算電子機器などへの用途拡大が望まれる。

ガラス基材フッ素樹脂多層材料の特徴は、以下の通りである。

- ① 低誘電率 ($\epsilon = 2.2 \sim 3.0$) で高速化が図れる。
- ② 低誘電正接 ($\tan \delta = 0.0002 \sim 0.0005$) で、伝送損失が少ない。
- ③ 厚さ精度が優れ、インピーダンス制御に適している。
- ④ 耐熱性に優れ、スルーホール部のスミア発生がない。

図 2.14 煮沸処理による電気絶縁性の劣化

図 2.15 加湿処理による電気絶縁性の劣化

なお、一般性能表を、表 2.11 に示す。

最近、アメリカではフッ素樹脂に無機充てん物を添加することにより寸法安定性を改善した材料や⁵⁾、フッ素樹脂に空気を充てんした膨張フッ素樹脂 (Expanded PTFE) を基材として、その基材に、エポキシ、ポリイミド等の熱硬化性樹脂を含浸させ低誘電率化を図っている例などが紹介され²⁾注目されている。

2.3.3.2. その他の低誘電率材料について

フッ素樹脂以外では、現在、PPO (ポリフェニレンオキサイド) をベースにした樹脂やシアネート系、ポリブタジエン系、ポリイミドをベースにした低誘電率樹脂などを用いた多層配線用材料の研究開発が盛んで、今後の実用化に期待が寄せられている。

2.3.4 おわりに

高速デジタル回路を使用する電子機器の増加に伴い、

表 2.11 多層配線材料の一般特性

項 目	単位	処 理 条 件	R 4737M (フッ素)	R 4775 (ポリイミド)	R 1766 (エポキシ)
誘 電 率 1 MHz	—	A	2.65	4.59	4.91
		D-48 / 50	2.65	4.61	4.95
誘 電 正 接 1 MHz	—	A	0.0003	0.0075	0.0178
		D-48 / 50	0.0015	0.0088	0.0196
はんだ耐熱性 (260℃)	秒	A	120 >	120 >	120 >
引きはがし強さ (18μm)	kg/cm	A	2.3	1.4	1.4
絶 縁 抵 抗	Ω	A	3.8×10^{14}	4.4×10^{14}	1.0×10^{15}
		D-2 / 100	2.2×10^{13}	3.7×10^{13}	2.2×10^{14}
体 積 抵 抗	Ω-cm	A	3.6×10^{15}	2.6×10^{15}	4.2×10^{15}
		C-96 / 40 / 90	1.1×10^{15}	1.5×10^{15}	3.3×10^{15}
表 面 抵 抗	Ω	A	4.6×10^{13}	3.6×10^{13}	5.0×10^{13}
		C-96 / 40 / 90	1.3×10^{13}	1.6×10^{13}	1.9×10^{13}
吸 水 率	%	D-24 / 23	0.02	0.31	0.16
難 燃 性 UL法	—	AおよびE-168/70	94V-0	94V-1	94V-0

1) 信号遅延の減少

2) クロストークの減少および他回路への妨害防止

3) インピーダンスコントロールの改善

4) 信号損失の減少

などが、機器の設計において非常に重要なファクターとなってきている。

これらのファクターを総合的に機器設計に組み込むためには、従来以上に、基材メーカ、プリント配線板メーカ、および機器（設計）メーカの三者が一体となった開発推進体制が望まれる。

its”, ELEC TRI・ONICS Electronic Edition, June, 1987

2.4 ポリイミド材料の動向

寺 本 直 樹*

Naoki TERAMOTO*

* 日立化成工業株式会社下館工場

* Shimodate Works. Hitachi Chemical Co., Ltd.

文 献

- 1) 富沢茂, 黒沢啓治, 渡辺雄二, 笠井修: “超高密度プリント配線板の積層技術開発”, I.P.C. Technical Paper WC IV-64, 1987
- 2) Daniel D. Johnson: “Laminate Spurs High-Speed Digital Processing”, Electronic Packaging & Production, Vol. 27, No 2, 1987
- 3) 橋本薫, 丹羽紘一: “セラミック多層回路基板の伝送特性に及ぼす誘電率の効果”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 71, No 3, 1988
- 4) 角憲明, 伊藤博良, 山中康弘: “配線のインピーダンスとクロストーク”, プリント回路学会, 電磁特性を考慮したプリント基板設計研究部会予稿集, Vol. 1, No 1, 1988
- 5) Steven C. Lockard: “Using Fluoropolymer Substrates For High Speed, Digital Circu-

2.4.1 はじめに

コンピュータなどの情報処理用電子機器は、その性能向上のために、高集積、高速度のLSIを使用したデバイスなどにより、演算速度の向上を図っている。このため、デバイス間の接続と支持体としての役割りをもつプリント配線板は、デバイス間の信号伝搬遅延時間を短縮するため、高密度配線（格子間隔の縮小、層数の増加、ブラインドホール採用など）が不可欠になってきている。そこで、耐熱性、寸法安定性などに優れたポリイミド樹脂を使用した超高密度多層プリント配線板（表 2.12）が急速に拡大している¹⁾。

本稿では、ポリイミド多層材料の特性、加工技術の動きおよび超高密度多層プリント配線板の信頼性について述べる。

表 2.12 超高密度多層プリント配線板の一例

項 目	超高密度多層 プリント配線板	一般 多層 プリント配線板
層 数 (層)	20~40	3~8
格 子 間 隔 (mm)	1.27, 2.54	2.54
格子間ライン数(本/格子)	1~2 / 1.27, 3~5 / 2.54	1~3 / 2.54
ブ ラ イ ン ド ホール 板 厚 (mm)	あり 3~8	なし 1~2
穴 径 (めっき) (mm)	0.3~0.8	0.7~1.1
板厚・穴径比(めっき後)	10~20	2~3

表 2.13 ポリイミド多層材料の特徴

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> ○耐熱性に優れる。 ○高温での特性低下が小さい。 ○厚さ方向の熱膨張率が小さい。 ○ドリル穴あけ時のスミア発生がほとんどない。 ○寸法安定性に優れる。 ○耐電食性に優れる。 ○耐薬品性に優れる。 	<ul style="list-style-type: none"> ○多層化接着時の成形性が劣る。 ○硬化性が劣る。 ○機械加工時にクラックが発生しやすい。 ○銅はく接着力(室温)が低い。 ○吸湿性が大きい。 ○高価である。

2.4.2 ポリイミド多層材料の動向

一般的なポリイミド多層材料の長所、短所をエポキシ多層材料と比較して表 2.13 に示した²⁾。

ポリイミド多層材料は、熱的特性に優れている反面、銅はくとの密着性、多層化接着時の成形性、硬化性などに劣る。このため、本来の特徴を生かすために、樹脂の変性技術、多層プリント配線板の加工技術の改善が進められてきている。

2.4.3 ポリイミド銅張積層板の特性

ポリイミド銅張積層板(以下ポリイミドMCLという)の特性を、エポキシ銅張積層板(以下エポキシ

図 2.16 スルーホール間絶縁抵抗

図 2.17 誘電率の温度特性

シMCLという)とを比較して述べる。

2.4.3.1 電気的特性

(1) 電食特性

高密度配線において、格子間隔が縮小し、ライン間隙が狭くなると、電食特性は重要な特性項目の1つである。図 2.16 に、85℃%RH, DC 100V 印加の条件でのスルーホール間絶縁抵抗を示した。

ポリイミドMCLは、穴壁間距離が狭くなっても優れた耐電食特性をもち、高密度配線に適している。

(2) 誘電率の温度特性

一例として、誘電率の温度特性を図 2.17 に示した。ポリイミドMCLの誘電率は、200℃までほとんど変化しないので、広い温度範囲で使用できる。

2.4.3.2 機械的特性

(1) 引きはがし強さの温度特性

高密度プリント配線板の回路の微細化にともない、引きはがし強さの絶対強度は小さくなる。このため、表面実装での部品装着時や部品交換時などに発生するランドはがれなどが大きな問題になる。図 2.18 に

図 2.18 引きはがし強さの温度特性

図 2.19 厚さ方向の熱膨張 (TMA法を用い、昇温10℃/分で測定した)

引きはがし強さの温度特性を示した。

ポリイミドMCLは、室温での引きはがし強さは1.6 kgf/cmとエポキシMCLに比べ低いが、250℃でもその変化が小さく、ランドはがれなどの不良が低減できる。

(2) 熱膨張特性

図 2.19に厚さ方向の熱膨張を示した。

ポリイミドMCLは、ガラス転移温度が約230℃とエポキシMCLより約100℃高く、高温加熱時の熱膨張が小さい。このため、熱応力が加えられたとき、スルーホールめっきクラックに対して有利である。

2.4.4 多層化接着用プリプレグの特性

プリプレグの特性は、ポリイミド樹脂の種類により、大きく異なる。日立化成工業が開発した、新規変性ポリイミド「H-I-L」は、反応性に優れた数種の官能基を導入した樹脂で、低温での硬化特性に優れている。図 2.20に、170℃の条件でキュラストメータで測定したプリプレグ中の樹脂の硬化特性

プリプレグをもみほぐして得られた樹脂粉末を、ホットプレートの中にはさみ、ホットプレートを回転させ、硬化過程で発生する応力を検出する。

図 2.20 プリプレグの硬化特性

表 2.14 プリプレグの特性

項 目	ポリイミド プリプレグ (GIA-67N)	エポキシ プリプレグ (GEA-67N)
樹 脂 分 (%)	50～56	53～58
揮 発 分 (%)	0.3～0.5	0.2～0.5
樹 脂 流 れ (%)	33～38	35～40
ゲル化時間 (170℃)(秒)	250～350	120～200
溶融粘度(130℃)(ポイズ)	100～600*	100～600*

(注) * 1000 ポイズ以上の高粘度品も製造可能。

を示した。

応力の飽和時間は硬化性、応力の絶対値は架橋密度を示している。「H-I-L」を用いたプリプレグ（以下ポリイミドプリプレグと略す）は、170℃の温度でエポキシプリプレグと同等の硬化性をもち、かつ架橋密度が高く、優れた耐熱性を示す。表 2.14に、プリプレグの一般特性を示す。

ポリイミドプリプレグは、エポキシプリプレグと同様の範囲で特性を調整することができ、多層化接着条件に合わせたプリプレグの設計が可能である。

2.4.5 ポリイミド多層プリント配線板の製造技術

2.4.5.1 内層接着前処理

ポリイミドは、銅はくとの接着力が低いことから、内層接着処理に関して、各方面より、研究が進められている^{3)～6)}。その一例として、図 2.21に内層前処理として、酸化処理を使用した多層プリント配線板の成形温度と内層引きはがし強さの関係を示

ポリイミド多層板の内層引きはがし強さを示しているが、170℃成形が可能なプリプレグを用いれば、高い内層接着力が確保できる。

図 2.21 成形温度と内層引きはがし強さ

表 2.15 多層化接着条件

項 目	ポリイミド プリプレグ (GIA-67N)	エポキシ プリプレグ (GEA-67N)
初 期 温 度 (°C)	130	130
初期温度保持時間 (分)	25	20
積 層 温 度 (°C)	170	170
積層温度保持時間 (分)	90	60
初 期 圧 力 (kgf/cm ²)	5	5
初期圧力保持時間 (分)	4～10	4～10
積 層 圧 力 (kgf/cm ²)	10～40	10～40
積層圧力保持時間	冷却終了まで	冷却終了まで

表 2.16 成形性試験結果

プリプレグ	「HI-L」を用いたポリイミドプリプレグ (GIA-67N)												従 来 の ポリイミド プリプレグ
プリプレグ 粘度 (ポイズ)	100			300			600			2000			
低圧保持時間 (分)	4	8	12	4	8	12	4	8	12	4	8	12	
積層圧力 (kgf/cm ²)	10	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	15	○	○	○	×	×	×	—	—	—	—	—	—
	20	○	○	○	○	○	×	×	×	×	—	—	—
	30	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	40	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×

○：ボイドなし (○)：真空プレス、ボイドなし ×：ボイド発生

した。低温硬化特性の優れたポリイミドプリプレグを用いることにより、内層接着信頼性を確保することができる。

最近では、ハローイングを防ぐために、耐塩酸性に優れた、酸化、還元内層処理法が開発され、さらに信頼性を高める方向で、実用化が進んでいる。

表 2.17 成形温度とガラス転移温度

項 目	単位	ポリイミドプリプレグ (GIA-67N)	エポキシプリプレグ (GEA-67N)
成 形 温 度	℃	170	170
内層板 (MCL) の ガラス転移温度*	℃	220～230	120～130

* ガラス転移温度はTMA法を用い、昇温10℃/分で測定した

基材厚 0.05 mm の MCL および同じ厚みのプリプレグを用い、50 層プリント配線板を製造して、成形前後の内層板の寸法変化を測定した。

図 2.22 多層化接着時の寸法変化

2.4.5.2 多層化接着条件および成形性

多層化接着条件の一例を表 2.15 に示した。表からもわかるように、エポキシプリプレグとはほぼ同条件で多層化接着が可能である。次に成形性の試験結果例を表 2.16 に示した。「HI-L」を用いたプリプレグは低粘度に設計することが可能なので、低圧積層でも成形性の良好な範囲は広い。また、真空プレスを採用すれば、10 kgf/cm² での成形も可能である。この場合、減圧度が不十分であると、ボイドが発生しやすくなるので、50 Torr 以下にする必要がある。

2.4.6 多層プリント配線板の特性

2.4.6.1 層間位置精度

回路の微細化および層数の増加に伴い、層間位置精度は、重要な課題である。層間位置精度を高めるには、多層化接着時に、内層板の不規則な動きを低減する必要がある。表 2.17 に、成形温度とガラス転移温度、図 2.22 に多層化接着時の寸法変化、また、表 2.18 に寸法変化のばらつきを示した。

図 2.22 から、ポリイミド内層板は、寸法変化の絶

表 2.18 内層板の寸法変化のばらつき (3 σ)

材 料	ばらつき量 (μm)		ばらつき率 (%)	
	たて方向	よこ方向	たて方向	よこ方向
ポリイミド多層プリント配線板	64	90	0.014	0.019
エポキシ多層プリント配線板	110	151	0.024	0.033

* パネルサイズ 500×500 mm

図 2.23 スルーホール接続信頼性

対値は大きい, そのばらつきは小さく, 成形圧力の影響を受けにくいことがわかる。これは, 表 2.17 に示すように, ガラス転移温度が成形温度より約50℃高いために, 成形中に内層板が軟質化しないので, 内層回路の不規則な配置による応力の影響を受けにくいためである。結果として, 表 2.18 に示すように, 寸法変化のばらつきは, エポキシ内層板のばらつきに比べ約半減できる。このため, ポリイミド多層材料を用い, 適切なスケールファクターをネガに設けることにより, 層間位置精度の高い高密度多層プリント配線板を製造することが可能となる。

2.4.6.2 スルーホール信頼性

全体厚さ 3.0 mm の 8 層板を作成し, MIL-STD-202 E Cond. B の条件で評価したスルーホール信頼性を図 2.23 に示した。

ポリイミド多層プリント配線板は, 200 サイクルを経過しても, スルーホール故障はなく, エポキシ多層プリント配線板に比べ, 優れた信頼性を示す。

2.4.7 おわりに

以上のように, ポリイミドの変性技術およびプリント配線板の加工技術などの改善がなされた結果, ポリイミド本来の高信頼性を有する超高密度多層プリン

ト配線板が, 高歩留まりで製造できるようになった。

情報処理用電子機器の演算速度の向上に対する要求は, 今後もますます強くなる傾向にある。多層プリント配線板の信号伝搬遅延時間は, 信号伝送距離および絶縁層の比誘電率により決まるため, ポリイミドと同等の耐熱性を有し, 比誘電率の低い新規材料の開発が望まれる⁷⁾。

文 献

- 1) S. Yokosawa et al.: "A New Polyimide Resin for High Performance Multilayer Wiring Boards", Proc. IPC World Conv. III-14, 1984
- 2) 塚西: "超高密度ポリイミドプリント配線板", 電子材料, 25, (10), 60, 1986
- 3) H. Akahoshi et al.: "New Copper Surface Treatment for Polyimide Multilayer Printed Wiring Boards", Proc. IPC World Conv. IV-9, 1987
- 4) A. Nakaso et al.: "Treatment of Innerlayer Copper Surface of Multilayer Boards by Electroless Copper Plating Technique", Proc. IPC World Conv. IV-10, 1987
- 5) 特開昭 56-153797「多層印刷回路板用基板の製造法」
- 6) 特開昭 60-133794「多層プリント基板の製造方法」
- 7) D. L. Wilok: Solid State Tech., Jan., 40, 1971

2.5 セラミック材料の動向

遠 山 洸*野 田 邦 治*

Hiroshi TOHYAMA* and Kuniharu NODA*

* 鳴海製陶株式会社特磁開発部

* Technical Ceramics Development Dept.,
Narumi China Co.

2.5.1 セラミック多層配線板の要求性能

セラミック多層配線板には, これまでアルミナ (Al_2O_3) が広く使用されてきた。アルミナはその

安定した電気的特性，機械的特性，化学的特性から，今後もさらに製造プロセスの進展と相まって，セラミック配線板の主流の座は当分続いて行く。

しかし，LSI，VLSIの高集積化は加速度的に進んでおり，メモリではすでに4M・DRAMが実用化の域に達しており，ゲートアレイ，スタンダードセルではゲート数の増大，高速化が進んでいる。これら半導体デバイスの高密度化，大型チップ化，高速化の流れには，従来の実装配線板材料の保有する材料特性では対応できなくなっている。

半導体デバイスから要求される実装配線板材料の要求特性をまとめると以下のごとくになる。

- ① 実装プロセス，および環境条件において，安定した信頼性が得られること。
- ② 現在，実装に使用されている材料に対し，同等のコストレベルが維持できる材料であること。
- ③ 高速化に追従できる材料＝低誘電率材料。
- ④ 大型チップ実装に耐え得る材料＝熱膨張係数がSiに近似した材料。
- ⑤ 高密度化チップの高放熱が可能な材料＝高熱伝導率材料。

①，②はいずれの製品においても共通項であり，ここでは③以下の3項目が将来材料としての重要課題である。

コンピュータにおける演算速度の問題は，半導体チップ側と実装配線板側に分けられている。半導体チップは微細加工技術の急速な進展により，図2.24に示すように，1975年を境に実装配線板上での信

号の遅れ（パッケージディレイ）が大きなウェイトを占めてきており，パッケージディレイをいかに改善するかが大きな課題となっている。

実装配線板の材料特性上，信号の遅延を左右するものは，前述のごとく，その材料固有の誘電率であり，遅延時間と誘電率との関係は次式で表される。

$$\text{信号遅延時間 } T_{pd} = \sqrt{\epsilon} / C$$

ϵ ：誘電率 C ：光速

セラミック多層配線板として多用されているアルミナの誘電率9.5に対し，最近各社から発表されている低温焼成配線板の誘電率は4.5～8.5と低く，例えば誘電率5の低温焼成配線板で実装配線板を構成すれば信号遅延時間はアルミナ実装配線板に比べ約30%の短縮となる。言い換えれば，コンピュータの処理速度を30%速くすることができるのである。

熱膨張係数に関しては，大型ベアチップの実装を可能とするためには，当然のことながら，実装配線板の熱膨張係数をSiの値（ $3.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）に近づける必要がある。アルミナの熱膨張係数は $7.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ と大きく，一般的にはチップサイズ 7mm^2 が限度とされており，これを越えるとアルミナ配線板上では温度サイクルによりチップが急速にダメージを受ける。

高熱伝導性については，ここで論ずるまでもなく，高密度実装が進めばすべての配線板の放熱が問題視され，放熱のための高熱伝導度材料が要求されるのは当然のことである。

次に，民生用をはじめとする配線板に視点を置き換えると，この分野では表面実装技術が急速に進展しており，携帯用小型ビデオカメラ，電子スチールカメラ等軽薄短小の最も要求される場所である。一方，これら回路のデジタル化が進行しており，高密度化した回路処理に多層化は必須となる。ここでは前記コンピュータに要求される特性のほか，限界にきている実装部品面積を減少させるために受動部品（C・R）をどこまで多層配線板内に入れ込むかが大きな課題となる。

2.5.2 セラミック多層配線板用材料

2.5.2.1 セラミック多層配線板の製造方法

セラミック多層配線板材料を検討するには，その

図2.24 大型コンピュータのシステムディレイに及ぼすパッケージディレイとチップディレイの年代別関係

製造方法を知る必要がある。

図 2.25に現在多用されているアルミナ多層配線板の製造工程を示す。セラミック多層配線板の製法は一般に厚膜法（乾式法）とグリーンシート法（湿式法）の2つに大別される。厚膜法は成形されたグリーンシートを約1500℃で焼結し、所定形状のセラ

図 2.25 セラミック多層プリント配線板(アルミナ)製造工程図

図 2.26 スーパーコンピュータ (IBM, 3081)用サーマル・セラミック・モジュール (TCM)

ミックとなした後、導体ペースト（Ag系，Au系）で第1配線層をスクリーン印刷法により形成，850～900℃にて焼成，次に絶縁ペースト（結晶化ガラスが主流）にて絶縁層を印刷形成し，850～900℃で焼成する。

上下の配線の導通は絶縁層に印刷形成されたビアホールを介して導体ペーストで接続する。この印刷，焼成の繰り返しにより多層化するのであるが，導体配線部の盛り上がりが集積され，多層化するほど表面の凹凸がひどくなり，部品搭載に支障をきたすことになる。また，Ag系の材料を使用した場合は，焼成の繰り返しにより絶縁層へのAgの拡散が進行するため，信頼性上の問題を考慮する必要がある。

厚膜法の利点は最上層に信頼性の高い抵抗体を形成できることであり，この特徴を生かしてアナログ回路に利用されることが多い。

厚膜法の層数は前記理由により，実用的には5層が限度といわれている。

グリーンシート多層はグリーンシートにスルーホール穴を打ち抜き，導体ペースト（W，Mo）で配線層を印刷形成する。この繰り返しにより必要層数を作成した後，重ね合わせて加熱圧着（ラミネート）し，金型で所定形状に成形する。

約1500℃の還元雰囲気中で，セラミックとメタル配線が同時焼結される。その後，表裏面に露出しているメタル配線にNi，Auめっきが施され，実装部品ランド，端子ランドが形成される。

この手法では50層以上の多層も可能となる。図2.26にIBM-3081スーパーコンピュータのメインフレームに組み込まれたアルミナ多層配線板(TMC)²⁾を示す。

2.5.2.2 セラミック新材料の動向

前項で記したとおり、コンピュータ用配線板や次世代ハイブリッドIC用配線板としては、アルミナ系セラミック材料では対応が困難となってきた。表2.19に最近の多層用セラミック材料の代表的特性を示し、以下各々について述べる。

(1) AlN

高速化(誘電率)、大型チップ実装(熱膨張係数)、放熱性(熱伝導率)の3つを有するものとしてAlN(窒化アルミ)が注目され、各社で開発が進められている。この特徴を生かしてパッケージとしてPGA等に一部試用されるレベルにあるが、多層配線板用としては改善すべき点が多い。最大の課題はAlNの高い焼結温度にある。各社から種々の焼結助剤(Y₂O₃, WO₃, CaO等)が提案され、1800~1700℃の還元あるいはN₂雰囲気中で焼成されているが、この焼成条件では使用できる配線用メタルが限定されてしまう。現在はWが使用されているが、Wは導通抵抗が高く(8~20mΩ/□)微細配線に難点がある。

また、セラミック材質の化学的特性に問題があり、

耐アルカリに弱く、めっきプロセスでの改善を行っても、信頼性上の問題が残される。

コスト面からみると、AlN粉末原料が高価(10000~15000円/kg)であり、また高温条件からくる焼成費用の問題がある。

特性面、コスト面での今後の改善が期待される材料である。

(2) SiC

熱伝導率が最も高く、熱膨張係数が3.7×10⁻⁶とSiチップに最も近く、大型高放熱チップの実装向きの材料であるが、材料特性上グリーンシート化が困難であり、現状では多層化困難である。

(3) ムライト

古くから各種産業用セラミック材料として利用されてきた材料であり、誘電率、熱膨張係数特性は実装配線板材料としては優れている。また、製造プロセスもほぼアルミナと同じであり、現在のアルミナ配線板用設備の大半が使用できるので、高速大型チップ用配線板材料として再開発が進められている。しかし、焼成温度がアルミナに近く(1450~1550℃)、アルミナ配線板と同様、使用メタルがW、Moとなり、導通抵抗が高く微細配線には難点がある。

(4) BeO(ベリリヤ)

BeOは特性的にはアルミナを上回る材料であり、特に熱伝導率が260w/mkと高く、グリーンシート

表 2.19 多層用セラミック材料の代表的特性

		かさ比重	抗折強度 kg/cm ²	熱膨張係数 ×10 ⁻⁶ /℃	熱伝導率 w/mK	誘電率	焼成条件		使用導体	グリーン シート化
							温度(℃)	雰囲気		
Al ₂ O ₃	グリーンシート用 92%	3.6	3000	7.5	20	9.2	1500	H ₂	W, Mo	○
	厚膜用 96%	3.7	3000	7.5	20	9.6	* 800～ 900	Air N ₂	Ag, Ag/Pd Au, Cu, Ni	○
AlN		3.4	4500	4.5	180～ 240	8.8	1700～ 1800	H ₂ N ₂	W	○
SiC		3.2	4500	3.7	270	15	HP 2100	真空	Ag / Pd Au	×
BeO		2.9	2200	6.8	260	7.0	1600	Air	W, Mo	○
ムライト		2.6	1500～ 2000	4.5	5	7.2	1500	H ₂	W, Mo	○
低温 焼 成	ガラス複合系 A	2.9	2000	5.5	2.5	7.7	900	Air	Ag, Ag/Pd (Cu)	○
	ガラス複合系 B	2.15	1400	1.9	—	3.9	900	Air	Ag - Pd	○
	ガラス複合系 C	—	1960	4.0	4.2	4.9	950～ 1050	非酸化	Cu	○
	結晶化ガラス系 D	2.56	1700	3.0	2.5	4.9～ 5.0	900～ 1000	Air	Au (Cu)	○
	非ガラス系 E	2.7	2500	4.8	8.4	7	950	非酸化	Cu	○

*多層形成時の厚膜焼成条件 HP: ホットプレス

化も可能であり、かつては国内でも生産されていたが、材料の保有する毒性のため、現在ではまったく生産されていない。ハイパワーチップの放熱用配線板として、アメリカから輸入されているのみである。

(5) 低温焼成配線板

高性能セラミック配線板材料として、低誘電率、低熱膨張係数、高熱伝導率を有し、かつ低導通抵抗をマッチングさせ、現在のアルミナ配線板と同等、あるいはそれ以下のコストで実現することは、現在では不可能に近い。これらの特性の1つである熱伝導率を犠牲にして多層化したものが低温焼成配線板である。

表 2.19の後段に各社の低温焼成配線板の特性例³⁾を示す。低温焼成セラミック組成により分類すると、最も発表例の多いものはアルミナ等と硼珪酸系ガラスとのガラス複合系である。表 2.19には次の3組成を代表例としてあげる。

A : $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{BSG}$ 60wt% + Al_2O_3 40wt%

B : SiO_2 35wt% + BSG 65wt%

C : Al_2O_3 50 wt % + BSG 50wt%

(BSGは硼珪酸ガラスを表す)

結晶化ガラス系ではコーゼライト系が発表されている。

D : $\text{ZnO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

さらにガラスを含まない非ガラス系としてはドロマイト系、セルシアン系等があり、表 2.19には非ガラス系、

E : $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3$

を示す。

特性的に概観すると誘電率・熱膨張係数はいずれも優れた値を示しており、2.5.1の③、④項に合致したものである。一方、抗折強度は 2000 kgf/cm^2 前後であり、熱伝導率は 10 w/mK 以下である。したがって前述したごとく、アルミナに比較してすべての特性を満足させ得るものではないことがわかる。その目的、用途に応じて材料システムを考察することが必要となる。一例をあげると、誘電率、熱膨張係数特性において、各系ごとにその値にかなりの差異が見受けられる。これは大型コンピュータ用配線板として信号の高速化、大型チップ実装に焦点を絞る場合と、民生用を主体とした配線板として信号の

図 2.27 内層抵抗 (鳴海製陶)

高速化にある程度対応しながら、抵抗体等を付加した総合的配線板に仕上げる場合に大別できると推定される。使用導体については組成系とのマッチング性の問題があり、画一的には区分できないが、大型コンピュータ用配線板にはAuまたはCu導体が使用され、配線板用には抵抗体の信頼性等によりAg系を、また、特に耐はんだ性、耐マイグレーション性が必要な場合にCu導体が用いられるようである。

筆者らは配線板用として、内層に100%Ag導体、外層に RuO_2 系抵抗体およびAg/Pd、Ag/PtあるいはAu導体システムと内層に100%Ag導体、外層に RuO_2 系抵抗体およびCu導体システムをすでに完成している⁴⁾。

低温焼成配線板の次の展開は受動部品の内蔵化による高密度機能ブロック化である。抵抗、コンデンサについてはすでに種々な提案がなされているが、全体的にはいまだ開発段階にあるといえる。抵抗については気中焼成可能な材料システムの場合はRu系抵抗体をグリーンシートにスクリーン印刷、積層し、同時焼成することにより形成できるが、その構成材料間のマッチング、例えばグリーンシートと抵抗体中のガラスの相互作用、各々の焼成収縮のバランス等を調整すること等が必要となる。図 2.27に筆者らが開発中の内層抵抗の断面写真を示す。Cu多層低温焼成配線板のような非酸化性雰囲気中で焼成する材料システムの場合は、気中焼成のシステムに比べて種々の制約がある。

一方、コンデンサの内層法としてはグリーンシート法、印刷積層法その他が発表されており、気中焼

図 2.28 内層コンデンサ(鳴海製陶)

成可能な材料システムの場合は、鉛ペロブスカイト系材料が有名である。図 2.28 に筆者らが試験した同上の内層コンデンサの断面写真を示す。コンデンサは 3 層構造で積層されており、その下部に Ag 導体による内部信号ラインが見えている。内層抵抗と同様、非酸化性雰囲気中で焼成する材料システムの場合には種々の制約が生じる。

さらに内蔵化した抵抗、コンデンサ共その焼成後のばらつき精度に課題がある。筆者らの実験では、

無調整の場合各々 $\pm 20 \sim 30\%$ 程度であり、実用には供し難い。特に高精度を必要とする抵抗に関しては、表面抵抗に対するレーザトリミング法等に相応する内層抵抗用の調整法が必要であり、RF コロナ放電法等 2, 3 の提案が最近なされているが、今後の進展を待たざるをえない。

文 献

- 1) 西垣, 野田: “低温焼成基板の開発状況”, FC Report, 6, [11], pp. 437~449, 1988
- 2) A. J. Blodgett, D. R. Barbour: “Thermal Conduction Module: A High Performance Multilayer Ceramic Package”, IBM Journal Research and Development, 26, [1], pp. 30~36, 1982
- 3) “本格実用期前夜を迎えた低温焼成基板” 日経ニューマテリアル, 8-3, [31], pp. 93~103, 1987
- 4) 野田, 遠山: “低温焼成多層セラミック基板”, 電子技術別冊, [12], pp. 90~91, 1988