低温焼成基板の考え方

——動向, LFC, ISHM '86——

Present and Future of Low Temperature
Fireable Ceramic Substrate

西垣 進*

1. まえがき

電子デバイスの高密度化, 多機能化, 小型・軽量化, 高信頼化が進む中で, 心臓部であるLSIのめざましい高性能化, 特に高速化, 高密度化, 高出力を果たして行くためには, その支えとなる実装基板の性能を今後大きく向上させないと, 機器のトータルの性能を上げることが困難になってきており, その意味で実装基板がますます重要視されてきている。しかも, 高性能化のレベルが進むにつれて, 信頼性の面からもセラミック基板の役割が増えてきている。低温焼成基板は, こうした背景の中で注目されている次世代のハイブリッドIC基板といえる。

さて筆者らは, 内層: Ag導体, RuO_2 抵抗, 外層: Ag-Pd導体の材料システムをもつ低温焼成基板 (LFC-1) を開発し, 60年10月米国アナハイムで開催されたISHM'85で発表し, また引き続き外層のAg-Pd導体のみをCu導体で置換した内層: Ag導体, RuO_2 抵抗, 外層: Cu導体システムをもつ低温焼成基板 (LFC-2) を61年10月米国アトランタで開催されたISHM'86で発表した。幸い両年とも最優秀論文賞を受賞するなど反響が得られたので, 比度本誌への投稿の要請をいただいたのを機会にLFCとISHM'86での発表の様子を紹介させていただきます。なお, あわせて低温焼成基板の各社の開発状況や今後の展望についても触れることにします。

2. 低温焼成基板の効用と今後の展望

高速コンピュータでは, マシンタイムを短縮するため

に, LSI (CPU) の高速化に伴い信号の伝播遅延時間を短縮することが不可欠で (伝播遅延時間, $T_{pd} = \frac{\sqrt{\epsilon}}{c}$), そのためには実装基板の誘電率の低下や配線導体の導通抵抗の低下が必須となってきた (導通抵抗の増大は出力電圧の低下や信号波形の歪みを招く)。

すなわち, 従来のアルミナ系のセラミック基板では, 誘電率が9~10と高いため, T_{pd} は10ns/mと大きく, 高速LSIのゲートのスイッチングスピードが1 ns以下であることからその重要さが分かる。

また, アルミナ積層基板ならびに厚膜ハイブリッドIC基板ではW/MoあるいはAg-Pb等の導体が使用されており, これらはどれも15~30 Ω m/ $\square$ と高い導通抵抗を有するため100~150 μ m幅のようにファインラインを形成しようとする抵抗値が上がり障害となってきた。ここに低誘電率セラミック材料でかつAgやCuのような低抵抗導体材料が使用できる低温焼成基板が求められている第一の必要背景がある。

また, 高速コンピュータに限らず, 電子機器でのLSIチップの高密度化に伴い, 実装基板の高密度化, すなわち3次元でのファインライン配線の多層化, $C \cdot R$ の混成化が必須条件となってきている。

すなわち, 最近の回路の流れであるデジタル化傾向は配線長の増大を意味し, 機能ブロック化の傾向は基板内, 外部への C (コンデンサ) や R (抵抗) の同時形成を必要とする (LSIの低電圧駆動に伴い, 高周波雑音を除去する目的で C の使用が増えている)。このような, 多層化と $C \cdot R$ の形成が構造的に容易なことが低温焼成基板の注目される第二の理由である。

また, 高密度なLSIチップは多数のI/O端子 (I/O端子数 $P = (2.5 \sim 4.5) \sqrt{G}$ (ゲート数), Rentの法則) を有するためパッケージの使用は困難で上記高密度実装基板上にベアチップのまま高密度にマルチチップ実装すること

*Susumu Nishigaki
鳴海製陶/Narumi China Corp.

が今後の趨勢となっている。ペアチップ実装の場合は基板との熱膨張係数の整合性が重要となる。

低温焼成基板は有機基板 ($35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) やアルミナ基板 ($7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) よりも熱膨張係数が小さい低熱膨張のセラミック材料すなわちSiチップ ($3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) に近い材料が使用できるという点でも注目される第三の必要背景がある。なお、低温焼成基板の熱伝導度 ($3 \text{ W/m}\cdot\text{K} = 0.01 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$) は、残念ながらアルミナ ($25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) に比べ約1/10程度と小さい。ただし、有機基板 ($0.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) に比べればなお約10倍優れているためCMOS等低出力のLSIチップの実装用基板として適している。もちろんチップの発熱を上部に取り去るなど、設計をくふうすれば高出力LSIの実装も可能である。以上で3つの必要背景が理解できたと思う。Fig-1は以上の効用をまとめたもの。

しからば、コスト、用途はどうだろう。低温焼成基板といってもAg系、Cu系、Ni系と材料系ならびにプロセスが各社でかなり差があり、民生用、産業用等目的によっても異なり、一概には論じがたい。しかし、アルミナの 1600°C という高温焼成に比べ、約 $800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ と低温でかつ多層同時焼成ができるという点で低コスト化への可能性は大きい。

また、実装基板の短納期化が今後ますます求められる中で、厚膜炉類似のベルト炉で焼成できるという点も魅力である。たとえば、気中焼成可能なAg系の低温焼成基板は、すでに3000億円市場を形成している厚膜ハイブリッドICの延長線上の位置づけにあると考えられる。従来基板では対応のむずかしい、高速でかつ抵抗付き多層ハイブリッドIC基板が最も近い時点で商品化されるものと思われる。

また、Cu系の低温焼成基板は還元焼成が必要で、かつCR形成が困難であるという点で、Ag系に比べてプロセスや材料のコントロールがむずかしいが、表面導体の耐マイグレーション性がよい、低コスト化が可能という点では、将来的には極めて魅力がある。商品化の順序としては、まずCu厚膜ハイブリッドIC基板が定着し、次の段階に位置づけられるものと思われる。筆者等の開発した後述のLFC-2基板はAg系とCu系の折衷的な位置づけにあるものと考えたい。

また、スーパーコンピュータ、IBM 3081に代表されるアルミナW/Mo多層基板は、高速化をさらに図るために表面層にポリイミドとCu導体を形成させるなど、色々な改良が加えられていることは周知の通りであるが、一方、低温焼成基板もこの種のコンピュータ用マルチチップマザーボードを始めとし、メモリボード等も含め、Ag系、Cu系ともに今後の有望な商品対象となろう。

(a) 高性能LSI対応: 高速化(低 ϵ , 低導通抵抗)[信号伝播遅延 $=\sqrt{\epsilon/C}$], 高密度化(多層化, ファインライン化, ダイレクトボンド) [Si: $3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]

2. 機能ブロック対応: C, Rの同時混成化
 3. 低コスト化対応: $800 \sim 1,000^{\circ}\text{C}$ 焼成, 短納期化, 基板の大型化
- Fig. 1 The advantages of Low Temperature Co-Fired Multilayered Ceramic Substrates

3. 各種低温焼成基板材料系

低温焼成基板で最近企業関係から発表された数は、10社にもおよび、わが国のアクティビティの高さをうかがわせる。ニューセラミック材料の新たな代表として注目されている。以下にこれらの基板の材料系を中心に傾向を見てみよう。

低温焼成基板は、セラミック (絶縁層)、導体、抵抗、コンデンサから構成され、そのどれも当然のことながら 1000°C 以下で焼成できる材料系からなっている。

セラミック材料では、

- 1) ガラス複合系すなわちアルミナや石英など耐火性酸化物とガラスの複合系
- 2) 結晶化ガラス系
- 3) 多結晶体から成る非ガラス系

に大きく分けられる。1) が材料系の主流になっている。焼成雰囲気は一般的には気中であるが、 N_2 中など非酸化性の雰囲気中でも焼成が可能である。

また、内層、外層用の同時焼成用導体材料としては、Au, Ag, Ag-Pd, Ag-Ptなど大気中で焼成可能な材料系と、Cu (面抵抗: $2 \text{ m}\Omega/\square$), Ni ($10 \text{ m}\Omega/\square$) のように非酸化性雰囲気中で焼成される材料系に分類される (Ag単体では、耐マイグレーション性がよくないので、外層用として裸で用いられることはほとんどない)。グリーンテープ上に形成されたこれら材料からなる導体パターンは、焼成収縮 ($15 \sim 18\%$) が一致するよう調整されねばならない。

抵抗については、気中で後焼きつけをする場合は、アルミナハイブリッドICで一般化している市販のRu系 (RuO_2 または $\text{M}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$) 抵抗が用いられる。しかし、抵抗値、

TCRに対しては基板の熱膨張係数が微妙に影響するので、アルミナ ($7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と大幅に異なる場合は、組成を調整する必要がある。

内装、外装用の同時焼成抵抗の場合は、グリーンテープ中のガラス成分等の拡散を考慮しなければならないので、一般的には市販ペーストのままではむずかしく、テープに合った抵抗ペーストの開発が必要となる。一方、後焼きつけ用還元抵抗の場合、Cu厚膜ハイブリッド基板用に開発された LaB_6 、 SnO_2 、 TaSi_2 等が使用できる可能性もあろうが、同時焼成用(還元)抵抗材料となると材料技術的に困難が予想される。

また、コンデンサは主に気中同時焼成(内装)により形成される。高誘電率系では、すでに低温焼成型コンデンサ材料として一般化しているPb複合ペロブスカイト系材料 { $\text{Pb}(\text{Fe}, \text{W})(\text{Fe}, \text{Nb})\text{O}_3$ 、 $\text{Pb}(\text{Mn} \cdot \text{Nb})(\text{Ni} \cdot \text{Nb})(\text{Mg} \cdot \text{W})\text{TiO}_3$ 等}の流用が最有望視される。もちろん、健全な内装コンデンサを得るには、同時焼成時のガラスの拡散、一部の相互反応、焼成収縮や熱膨張係数のミスマッチ等多くの課題が予想される。なお、還元同時焼成用のコンデンサ材料となると未知数といってよからう。ただし、低誘電率系、すなわち ϵ が100程度の小容量のコンデンサの場合は、同種絶縁材料または改良材料を用いればよいので、気中、還元焼成のいずれでも問題なく内装化が可能となる。以上の材料系をTab. 1に示した。あわせて、最近報告された代表的な低温焼成基板のセラミック材料系と後述の特性の関係をTab. 2にまとめた。

4. 各種低温焼成基板の特性

低温焼成基板の特性の中で、アルミナ基板に比べ劣るものは、強度と熱伝導度である。強度に関しては、結晶化ガラス系の中に非常に高い値 ($4000\text{kg}/\text{cm}^2$) の報告例もあるが、最も一般的なガラス複合系では約 $2,000\text{kg}/\text{cm}^2$ のレベルにあると考えてよい。

高強度を得るためには、フィラーであるアルミナの含有量が、焼結できる範囲内で多いほど望ましい。例えば、アルミナ55%を含む鉛ホウケイ酸ガラス複合系で、 $100\mu\text{m}$ 厚グリーンテープをホットプレス (110°C 、 $250\text{kg}/\text{cm}^2$) で積層した場合、 $3,000\text{kg}/\text{cm}^2$ とアルミナ並の強度を得たとの報告もある¹⁾。ただし、多くなるほど、誘電率や熱膨張係数の面では不利となる。

また、特徴となる低誘電率、低熱膨張係数を得るためには、結晶化ガラス系も有望であるが、ここでは最も一般的なガラス複合系について説明する。複合系の誘電率(ϵ)は、各成分の ϵ の体積混合側から求めた計算値とよく一致する。ガラスならびにフィラーの種類、量により異

なり、Tab. 2からも分るように、 $\epsilon=4.25 \sim 7.7$ とかなりの幅が見られる。アルミナ ($\epsilon=9.5$) よりはどれもかなり小さい。

また、熱膨張係数(α)は、市販の厚膜ペーストの使用を考慮して、一部にはアルミナ同様高い α をもつものもあるが、大半はSiチップ ($3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) との整合を考慮して $\alpha=2 \sim 6$ と低い。なお、低 α 化を図るためには構成する材料(Ex. ガラスと耐火性酸化物)の選定が重要である。LFC基板の α ($5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) は、焼結過程で生成する結晶相のアノーサイトの α ($4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) が影響する。構成成分であるガラス ($6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) とアルミナ ($7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) の α より小さくなる事実は、大変興味がある。

4. 1 ISHM'86での低温焼成基板関連の発表内容

“Multilayer Technology” Sessionで6件のうち、低温焼成基板関連の発表が4件行なわれた。まず、関連タイトルを紹介する。

- ・ T. 4. 1 : A New Low Temperature Fireable Ag Multilayer Ceramic Substrate Having Post-Fired Cu Conductor (LFC-2) (西垣, 福田, 矢野, 河辺, 野田, 深谷, Narumi China Corp.)
- ・ T. 4. 2 : Processing and Reliability of Resistors Incorporated Within Low Temperature Co-Fired Ceramic Substrates (R. G. Pond, et al., Hughes Aircraft Co.)
- ・ T. 4. 3 : Low Temperature Co-Firable Ceramics With Co-Fired Resistors (H. T. Sawhill, et al., Du Pont)
- ・ T. 4. 4 : Development of A New Tape Dielectric Technology For Thick Film Multilayer Applications (W. A. Vitriol, et al., Hughes Aircraft Co.)

4. 2 LFC基板の狙い

すでにISHM'85で発表したペーパーのタイトルは“A New Multilayered Low-Temperature-Fireable Ceramic Substrate”で、基板の外層(表面)導体にAg-20Pdを、内層導体にはAgを、抵抗には RuO_2 を用いたシステムを気中同時焼成(Co-Fire)するものであった。また、ISHM'86で発表したLFC-2では、内層導体のAgと抵抗の RuO_2 をLFC-1同様に、同時焼成により形成し、表面の外層導体のみを後焼きつけ(Post-Fire)したCu-Ag- RuO_2 システムを紹介した。

LFC-1では導通抵抗の優れたAg(ほとんど100%)を用い、高信頼の多層化が可能なることを信頼性データをもとに立証した。すなわち、一般にAg系は、高温高湿下ではガラス中を容易に拡散し、また電界下ではマイグレーションを起こすことはよく知られており、低温焼成基板

Tab.1 Relationship between Material System and Firing Atmosphere of Low Temperature Co-Fired Multilayered Ceramic Substrates

材料系			雰囲気	気 中 焼 成		還元(中性)焼成
セラミック				ガラス複合系 結晶化ガラス系 非ガラス系		ガラス複合系 結晶化ガラス系 非ガラス系
導 体	同時焼成	内層		Au, Ag , Ag-Pd		Cu, Ni
		外層		Au, Au-Pt, Ag-Pd		Cu, Ni
	後焼付	内層		Au, Au-Pt , Ag-Pd		Cu , Ni
抵 抗	同時焼成	内装		Ru系		?
		外装		Ru系		?
	後焼付	外装		Ru系		LaB ₆ , SnO ₂ , TaSi ₂ , サーメット?
コンデンサ	高誘電率系	同時焼成	内装	Pbペロブスカイト系 (Ex. Pb(Mn·Nb)(Ni·Nb)(Mg·W)TiO ₃ Pb(Mn·Nb)(Fe·W)(Fe·Nb)(Zn·Nb)O ₃)		?
	低誘電率系	同時焼成	内装	同材質絶縁体(共材)		同材質絶縁体(共材)

注) 1 □: LFC基板

Tab.2 Comparison of Material Characteristics of Various Low Temperature Co-Fired Multilayered Ceramic Substrates

区分	材 料 系		抵抗強度 (kg/cm ²)	誘 電 率 (1MHz)	熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	熱伝導率 (cal/cm.s.°C)	絶縁抵抗 (Ω・cm)	使 用 導体材料	焼成雰囲気	文献
A	ガラス複合系	鉛ホウケイ酸 ガラス+アルミナ	3000	7.5	4.2	0.01	2.9×10 ¹⁴	Au Ag-Pd	900°C 空気	1)
B		アルミノ・カルシウム ホウケイ酸ガラス+アルミナ	2000	7.7	5.5	0.006	>10 ¹⁴	Ag Ag-Pd(Cu)	800°C 空気、非酸化	2),3)
C		アルミノ・マグネシウム ホウケイ酸ガラス+石英ガラス	—	4.25 ~4.55	3~6.5	—	—	—	850~900°C 空気	4)
D		—	2100	8.0	7.9	アルミナの 15~25%	>10 ¹²	Au, Ag Ag-Pd	850°C 空気	5)
E		ホウケイ酸ガラス+アルミナ	2000	5.6	4.0	—	—	Cu	1000°C 非酸化	6)
F		ホウケイ酸ガラス+アルミナ +フォスフェイト	2000	6.5	6	0.007	—	Ag-Pd	850~900°C 空気	7)
G	結晶ガラス系	コーゼライト系 β-スボジュメント系	2000 ~ 4000	5.3~5.7 5~6.5	2.4~5.5 2~8.3	—	—	—	850~1050°C 空気、非酸化	8)
H		コーゼライト系 ZnO-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	1700	5.6	2.2~2.4	0.006	—	Au	950~1000°C 空気	9)
I	非ガラス系	BaSn(BO ₃) ₂ (ドロマイト)	1350	8.5	5.5	0.007	—	Ag-Pd	960~980°C 空気	10)
J		Al ₂ O ₃ -CaO-SiO ₂ MgO-B ₂ O ₃ (ZrSiO ₃)	2500	6.7	4.8	0.02	>10 ¹⁴	Ni Cu	900~1000°C 非酸化	11)
K		BaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -CaO- B ₂ O ₃ (BaAl ₂ Si ₁₂ O ₈)	2000	6.1	8.0	0.01	>10 ¹⁴	Cu	950~1000°C 非酸化(N ₂ ・H ₂ O)	12)
比 較	アルミナ(96%)		3200	9.6	7.5	0.07	>10 ¹⁴	W	1600°C 還元(N ₂ ・H ₂)	

注) A: 日電, B: 鳴海製陶, C: 日立, D: デュボン, E: 富士通, F: 旭硝子, G: IBM, H: 日特, I: 東芝, J: 太陽誘電, K: 村田

用内層導体としてほとんどAuが主体であった。そこで、筆者らは、種々の組成の中から結果的に、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 系ガラスを選定し、フィラーとして Al_2O_3 を添加したガラス複合系セラミックが高信頼で、Agの多層化が十分可能なことを確認した。その後、他社からも低温焼成基板での高信頼のAg多層化が可能との報告が見られるようになってきた。

近年、Cu多層厚膜ハイブリッドが³、導体の導通抵抗の低下と、低コスト化を目的に、精力的に開発が行なわれ、また実用化され始めていることは周知の通りである。この場合、多層化の層数が増すと、Cu導体の酸化を抑制しながら N_2 中で脱バインダーを行なうには、プロセスコントロールの面で大変困難を伴う。そこで、LFC-2では、この問題を改善するため表面層だけをCu導体とし、内層にはLFC-1で、すなわちAg多層と RuO_2 抵抗を同時形成するという新しい材料システムを発表した訳である。

4.3 Du Pont System 関連発表

他の3件の発表は、すべてDu PontのCo-Fireable Dielectric Material System——グリーンテープの他に配線導体としてAu, Ag, Ag-Pdを、抵抗体として1900シリーズ（後焼付）を含む——を使用したもので、以下に興味ある点をピックアップして説明する。

T・4・2では、アルミナ厚膜多層用抵抗1900シリーズを流用し、表面層に同時焼成（ 850°C ）と後焼きつけ（ 850°C ）により抵抗を形成（ターミネーション： 6134Ag-Pd ）した結果、両法ともにアルミナ並の特性レベルで抵抗体の形成が可能で（Ex. $10\text{k}\Omega/\square$ （ノミナル） $\rightarrow 11.8\text{k}\Omega/\square$ （同時） $\rightarrow 12\text{k}\Omega/\square$ （後焼きつけ））かつ長時間高温恒湿保管等環境試験後の抵抗値変動も0.8%以下と小さく、安定性にも優れていることを報じている。内装同時焼成抵抗については、まだ低抵抗側のTCRに問題があるようである。

T・4・3では、抵抗を内装、外装化したマルチチップパッケージの製作を意図し、上記同様1900シリーズを用い、積層体表面（キャピティ底面）ならびに内部にポストプロセス（抵抗形成をターミナル形成に先行）により厚膜抵抗を形成し（ターミネーション：Au）、同時焼成後の抵抗体特性の評価結果を報じている。抵抗値偏差は、外装抵抗が10~15%（ $3\sigma/\bar{x}$ ）、内装抵抗が15~20%。信頼性試験後、前者が最大 $\pm 2\%$ 、後者が最大 $\pm 3\%$ の抵抗値変動にとどまるとしている。

T・4・4では、アルミナの厚膜法の欠点である多層化時の絶縁層の信頼性を改善するため、低温同時焼成用テープ（ $100\mu\text{m}$ 厚、ビアホール付）をアルミナ基板に張り合わせ、焼成 $\rightarrow$ ビア印刷 $\rightarrow$ 焼成 $\rightarrow$ 回路印刷 $\rightarrow$ 焼成後再び第2のテープを張り合わせ、これを繰り返す方法により、従来の厚膜法よりもプロセス短縮、信頼性を向上できると

している。なお、張り合わせ焼成の場合、厚膜と同様に厚み方向収縮だけが起るようである興味がある。

5. LFC基板の紹介

5.1 製法、構造

LFC-1, 2基板の製法、構造を整理してまとめてみると、次のようになる。

5.1.1 グリーン（生）テープ作成

$\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ ガラス粉末と Al_2O_3 粉末がそれぞれ60:40（重量%）からなる混合粉を溶剤、バインダー、可塑剤、分散剤とともにスラリー化し、ドクタブレード法により、例えば0.1~0.3mmのグリーンテープを作成する。

5.1.2 Ag導体による多層化（生）

導通抵抗の低いAg導体を多層化する方法として、テープ積層法と印刷積層法がある。前者はビアホールが穿穴された所要層数のグリーンテープにそれぞれAg導体を印刷（ビアホール穴埋ならびに回路形成）し、ビアを介して上下の回路が接続されるように重ね合わせ、ホットプレス（Ex. 110°C , $70\text{kg}/\text{cm}^2$ ）により各グリーンシートを積層一体化する方法である。一方後者は、スルーホールが形成されたベースになるグリーンテープ（Ex. 0.8mm ）上にAg導体と絶縁層（通常 $40\mu\text{m}$ 厚）を交互に、印刷法により多層形成する方法である。

5.1.3 RuO_2 抵抗とAg-20Pd導体の形成（生）

内層Ag導体の多層化後、外装抵抗（ $10\Omega/\square \sim 1\text{M}\Omega/\square$ $\text{TCR} \pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ）をAg-20Pdを電極材として形成する。続いて、オーバーコート（テープと同材質、 $10\mu\text{m}$ 厚）をかける。

なお、特に抵抗の精度を要しない場合は、抵抗値偏差20%（ $3\sigma/\bar{x}$ ）程度で内部に抵抗を形成することも可能である。あわせて外層導体として、Ag-20Pd導体を形成する。

5.1.4 同時焼成- RuO_2 のレーザートリミング（LFC-1）

内層：Ag導体、 RuO_2 抵抗、外層：Ag-20Pd導体を形成した後、 880°C で（通常20分ホールド）一体同時焼成する（通常1時間）。 RuO_2 抵抗をオーバーコート上からレーザートリミングをし、LFC-1基板が完成する。

5.1.5 Cu後焼きつけ- RuO_2 のレーザートリミング（LFC-2）

外層にCu導体を形成するときは、内層：Ag導体- RuO_2 抵抗（オーバーコート付）までを同時焼成した後、Ag系導体スルーホールののぞいた焼成済み基板上に外層Cu導体を厚膜印刷し、 N_2 中 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ （通常10分ホールド）

Fig. 2 Fabrication Process of Our Low Temperature Co-Fired Multilayered Ceramic Substrates (LFC-1, 2)

で後焼付けし、Cu-Ag接点ならびにCu導体回路を形成する。最後に、RuO₂抵抗をオーバーコート上からトリミングしLFC-2基板が完成する。なお、外層導体としてCu導体だけでなく、Ag-20Pd導体（同時焼成）も同時に表面に形成させることも可能である。以上、製法の概要をFig. 2に示した。あわせてLFC-1, 2基板の構造概念図をFig. 3に示した。

5. 2 特 徴

5. 2. 1 セラミックの特性

(1) 低誘電率，低熱膨張率，低ヤング率

LFCセラミックの基本的特性をTab. 3に示した。アルミナ基板に比べ，低誘電率（7.7），低熱膨張率（ $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）に加え，低ヤング率（11,800kg/mm²）である。低ヤング率でかつ低熱膨張率であるため，急熱，急冷時の臨界温度差がアルミナより約100℃高く，半田づけ時に必要な耐熱衝撃性に優れる。

(2) 高速焼成性

LFC基板は，高速焼成が可能である。気中焼成といえども脱バインダーを十分考慮しなければならない。

基板厚みが厚いとき，またはグリーンテープ厚が薄くても高速で焼成する場合特に重要。要は熱分解性のよい

Fig. 3 Schematic Cross-Sectional View of LFC-1 and LFC-2 Substrates

Tab. 3 Characteristics of LFC Substrate

嵩比重	2.9 g/cm ³
抗折強度	2,000 kg/cm ²
熱膨張係数(r.t.~250℃)	$5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
誘電率(1MHz)	7.7
絶縁抵抗(100V.D.C)	3×10^{-4}
ヤング率	$> 10^{11}$ Ω・cm
表面粗さ	11,800 kg/mm ²
熱伝導率	0.2 μm Ra
収縮率	0.006 cal/cm·sec·℃
誘電体損失(1MHz)	16%

バインダーを使うことと，構成する生セラミックの微構造としては生成する分解ガスや燃焼ガスの飛散を容易にすることが重要となる。Fig. 4に微構造モデルを示した。できるだけ高温までグリーンテープが収縮せず，開気孔を保持させることがポイントで，LFC基板の場合，Fig. 4(b)の収縮カーブが示すように高屈服点ガラス（730℃）を使用することでこれを果たしている。

高速焼成時には，通常のバインダーでは600~700℃の高温までガス生成を伴うため，ガラスが軟化しやすい場合には開気孔が閉塞され，燃焼の困難なカーボンがガラス内に閉じ込められ基板にプリスターを多発させる原因となる。

(3) 基板の熱抵抗

ガラスとアルミナの複合系であるLFC基板は，焼成の最終段階でアノサイトの結晶化が起る。Fig. 5から

アノサイトの折出後の基板は、熱膨張曲線からも分かるように最早1,000°C付近まで屈服点をもたず、複数回の高温熱処理にも耐え得るようになる。すなわち、繰り返しの後焼きつけが可能なることを意味する。

5. 3 セラミックと導体の両立性

5. 3. 1 内層Ag導体の層間絶縁性

LFC基板の最大の特徴は、内層に導通抵抗の低い ($2.5 \text{ m}\Omega/\square$) Ag導体を用い、高信頼性の多層化が可能なことである。Fig- 6 (a)に長時間の高温恒湿負荷試験後も $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の高い絶縁性と、 $4 \text{ kV}/30 \mu\text{m}$ 以上の高いDC破壊耐性をもつことを示した。かかる高信頼絶縁の理由として、

1) LFCは、ほとんど気孔のない緻密な微構造 (Fig. 7) を有し、Agの拡散を大幅に抑制できること。また、同時焼成であるため、セラミックとAg導体界面の内在応力を最小限に抑えることができ、欠陥形成によるAg拡散の抑制効果があること。これに対し、通常の厚膜ハイブリッドでは、プロセスの必然性として基板との焼成収縮

のミスマッチや繰り返し焼成により絶縁層（誘電体）内部に欠陥が生成しやすく、これらの欠陥を通じてAgの拡散が起りやすいものと考えられる。

2) また、プロセス面と結晶組織面からも、Ag拡散が

(a) アノーサイトの生成

(b) LFC基板の熱抵抗性

Fig. 4 Shrinking Behavior and its Microstructural Model of a Green Tape of LFC Substrate

Fig. 5 Deformation Resistance of LFC Substrate During Post Firing due to the Crystallization of Anorthite

Fig. 6 High Insulation Resistance of Internal Layers between Ag Conductors

一層抑制されることになる。すなわち、

(イ)短時間の焼成はAgの拡散を最小限に抑えることができる。この面でも繰り返し焼成が行なわれる厚膜法では不利である

(ロ)CaO-Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃系ガラスの組成と結晶相の適性も重要

LFC基板の耐Ag拡散性には、ガラス組成のみならずAl₂O₃との反応で生成されるアノサイト微結晶の効果も寄与しているものと考えられる。Fig. 6 (b)では、絶縁層中へのAgの拡散が、EPMAレベルでは確認できないことを示す。

5. 3. 2 外層導体 (Ag-20Pd, Cu) の耐マイグレーション性

ハイブリッド基板上に多ピンのLSI(ファインパターンを必要とする)を樹脂モールドなしに裸で表面実装する場合などには、外層導体の耐マイグレーション性が重要となる。Fig. 8 は水滴試験の結果で、当然のことながらAg-20Pd導体よりもCu導体の方が耐マイグレーション性に優れ、しかも導体間隔(電極ギャップ)が100μmと狭くなるとCu導体の効果はいつそう顕著となることが分かる。

通常のハイブリッドレベルの耐マイグレーション性を

LFC
(ポアサイズ, <2~3μm)

Fig. 7 Microstructure of LFC Substrate

Fig. 8 Migration Resistivity of External Conductors of Ag-20Pd and Cu

要する場合はAg-20Pdの導体で十分である。Fig. 8 ではLFC基板と従来のハイブリッド基板のそれを比較している。LFC基板がより耐マイグレーション性に優れていることが分かる。層間絶縁性が優れている理由の一つに“アノサイトの形成”をあげたが、この場合も水滴と電界の作用で形成される酸化物のイオン化と陽イオンの陰極への移動 (Ag₂O→2Ag⁺+O²⁻, CuO→Cu⁺⁺+O²⁻), すなわちマイグレーションが“アノサイト”によって抑制される効果があると考えられる。

なお、外層導体が部品実装用パッドとして使われる場合は、ピール強度、半田濡れ、耐半田性等が要求される。LFC基板の場合、これらの特性はほぼ通常のハイブリッド並と考えてよい。参考までにFig. 9にAg-20Pd, Cu外層導体のピール強度を、またFig. 10に外層Cu導体の耐半田性 (Du Pont 6001D, 600℃焼成) を示した。

5. 3. 3 Ag-Ag-20Pd, Ag-Cu接点の高信頼性

LFC-1基板での内層Agと外層Ag-20Pdの接点は同時焼成でかつ同系材料ゆえまったく接点の不安はない。ここでは、Ag-Cu接点に限り説明する。すなわち、内層導

体Agは表面のCu導体とAgのスルーホール (AgまたはAg-15Pd) を介して接続されることになる。高信頼の接合を得るためには779℃のAg-Cu共晶点以下、すなわち、金属間化合物が形成されない温度の600～700℃で後焼きつけを行なうことが重要なことが分かった。接合の信頼性を試験するため、Fig.11に示すテストパターン (Ag-Cu接点 (ビアホール) 804個をもつ) を試作し、冷熱サイクル試験後の導通抵抗変化を調べた。500サイクル後でも、2%以下 (初期値約4Ω) の変化にとどまり、接点断面のAg, CuのEPMA分析でも、その健全性が立証された。

Fig. 9 Peel Strength of External Conductors of Ag-20Pd and Cu

(b) テストパターンとCu-Ag接合部のEPMA

Fig. 11 High Reliability of Cu-Ag Interconnection

LFC 基板上のCu 導体 (6001D)		
初期状態	ディップの繰り返し回数	
	5	10
Al ₂ O ₃ 基板上の厚膜用Ag-20Pd 導体 (TR-4846)		
初期状態	ディップの繰り返し回数	
	5	10

ディッピング条件: 260℃の62Sn/36Pb/2Ag 半田槽に5秒浸漬
 残存率 Cu on LFC: 100% (5回), 100% (10回)
 Ag-20Pd on Al₂O₃: 73% (5回), 21% (10回)
 Fig. 10 Solder Wettability and Leach Resistance of Cu Conductor formed on LFC Substrate

Fig. 12 High Reliability of Co-Fired Resistors After Post Firing
Cu Conductor in N₂ Atmosphere

Fig. 13 LFC Substrate having the Same Function and the Half
Size with Conventional Hybride Substrate

5. 4 抵抗の容易形成

RuO₂と共材ガラスを用い、面抵抗値、TCR値を調製した抵抗ペースト（5種類）を用い、オーバーコートとともに同時焼成した後、レーザートリミングすることにより

所望の抵抗値（精度： $<\pm 1\%$ ($3\sigma/\bar{x}$)）を有する抵抗体を得ることができる。トリミング後の信頼性も高く、各種信頼性試験後も抵抗値は $\pm 0.3\%$ ²⁾以内に入る（LFC-1）。

Fig. 14 LFC Substrate having Resistors and Capacitors

Fig. 16 LFC Substrate having Cu as Top Conductor and Ag as Internal Conductor

また、Cu導体の後焼きつけによっても特性値の変化はほとんどなく（抵抗値変化1.2%以下）、またトリミング後の信頼性もLFC-1基板同様 $\pm 0.3\%$ 以内と高いことが確認できた（Fig.12）。

5. 5 用途と試作例

LFC基板は上記のような特徴を有し、従来のアルミナ多層基板と厚膜ハイブリッド基板の両機能を備え、かつ今後の高性能LSIに対応できる特性をもつことから民生用、産業用（コンピュータ、通信、自動車用等）で高密度抵抗付多層ハイブリッド基板として広い用途が期待される。LFC多層基板は製法から考えて、層数が増えるに従って他法（アルミナハイブリッド厚膜基板、有機多層基板）よりもコスト的に有利になる。いい換えれば層数

Fig. 15 LFC Substrate having Resistors and Many Numbers of Via holes

を増やすことにより小型化と低コスト化が果たせることにもなる。以下に試作例を示す。

Fig.13は従来のアルミナ系ハイブリッドを多層化により小型化した一例である。Fig.14は高信頼性の抵抗と小容量コンデンサを多数、外装、内装した機能ブロック用の基板の一例である。Fig.15は内部に多数（約 5000個）のビアホールを有し、表面に抵抗を後焼付けした積層コンピュータ基板（8層）である。Fig.16は表面にCu導体パターンを配したメモリモジュール基板（LFC-2）である。

6. あとがき

LSIの高性能化に伴い、セラミック基板の重要性が増す中で、今や、特性的にアルミナ系基板だけでは対応でき

ない状況となりつつあり、熱伝導性の面では高熱伝導性SiC, AlN基板が、また高速化、多層化の面では低温焼成基板が開発されつつあることは上述したとおりである。

筆者らが開発した低温焼成基板は、内層に信頼性が高く、かつ導通抵抗の低いAg導体を用い、表面層に耐マイグレーション性のよい、通常はAg-Pd, Ag-Pt導体を、特殊用途にはCu導体を用いた材料システムで、

- 1) 3~20層の多層化が容易
- 2) 100 μ m程度までのファインパターン化が可能
- 3) 高信頼性RuO₂系抵抗が形成できる
- 4) 低膨張でLSIのダイレクトボン드가可能

など高速性、高密度化、低コスト化に対応できる新しい多層ハイブリッドIC基板として期待される。今後、ユーザー側で、LFC基板にふさわしい利用開発が進められることを願っている。なお、低温焼成基板はまだ段階的には萌芽期で、基礎的、技術的に多くの問題を抱えており、今後幅広い多くの研究者の方々が参画され、同基板の真価が発揮される日が近いことを願うものである。

参 考 文 献

- 1) Y. Simada, K. Utsumi, M. Suzuki, H. Takamizawa, M. Nitta and S. Yano : IEEE, 314 (1983).
- 2) S. Nishigaki, S. Yano, J. Fukuta, M. Fukaya and T. Fuwa : Proceedings '85 ISHM, 225-234 (1985).
- 3) S. Nishigaki, S. Yano, H. Kawabe, K. Noda and M. Fukaya : Proceedings '86 ISHM, 429-449 (1986).
- 4) H. Tosaki, N. Sugishita and A. Ikegami : ISHM, 100 (1981).
- 5) J. I. Steinberg, S. J. Horowitz and B. J. Bacher : EHM, 340-346 (1985).
- 6) N. Kamehara, K. Kurihara and K. Niwa : Annual Meeting of Am. Ceram. Soc., (1985).
- 7) K. Kondo, M. Okuyama, Y. Shibata : Am. Ceram. Soc., Electronic Division Fall Meeting, (1985).
- 8) IBM, US Pat. 4413061, (1983).
- 9) K. Kawakami and M. Takabatake, Am. Ceram. Soc., Electronic Division Fall Meeting, (1985).
- 10) トルン・ディン・タン, 岩瀬 : 電子通信学会技術研究報告, 17, (1983).
- 11) S. Tosaka, S. Hirooka, N. Nishimura, K. Hoshi and N. Yamaoka : IEEE, 358, (1984).
- 12) H. Mandai, K. Sugoh, K. Tsukamoto, H. Tani and M. Murata : IMC 1986 Proceedings, 61-64, (1986).