

ユーザーからみたニューガラスの利用と開発

(株)富士通研究所・厚木研究所 丹羽 紘一

Developments and applications of new glass materials

Koichi Niwa

Fujitsu Laboratories Atsugi Ltd.

1. はじめに

ガラスは家屋や自動車の窓ガラスとして、あるいは食器用として古くから使用されている。窓ガラスは耐環境性が求められ、外部との遮へいが主目的で透光性が必要条件となっている。ガラス容器も耐水性と透光性といったガラスの性質が最大限に利用されていると言える。

一方、セラミックスは、古くは磁器として食器等に使用されてきたが、現在この言葉の響きからは、工業利用のイメージが強い。特にアルミナは、LSIのセラミックパッケージを初め、コンピュータの多層基板にも使用され、電子機器においてセラミックスは重要な存在となっている。

しかし、電子機器の性能向上がめざましい今日にあつては、これらセラミックスに対する要求も高度化と同時に多様化の様子を示しており、例えばアルミナ単体の性質をいくら追求してもそれを満足することが不可能なような要求も増えつつある。

この高度な要求を満足させるための一方法として、ガラスの利用が考えられ実施されている。ガラスの有する性質をセラミックスの性質と組み合わせ複合化して、高度な要求を満足させようとするものである。ここでは、これらの高度な要求を満足させる材料として誕生した、ニューガラスの

利用と開発について、ガラスとセラミックスの複合系を中心に述べる。ガラスとセラミックスの比較から、ニューガラスの応用例について一通り述べるつもりである。

2. ガラスとセラミックスの比較

電子機器にガラスあるいはセラミックスを応用する際に重要となる特性の一つに誘電特性がある。いろいろなけい酸塩ガラスの誘電率は、低いもので純粋な石英ガラスの3.7から高鉛ガラスの~10の範囲に入る。誘電正接($\tan \delta$)は 10^{-4} から 10^{-2} の程度であり、純粋な石英ガラスで最も低く、高アルカリガラスで最も高くなる。誘電率および誘電正接の周波数による変化をFig. 1に示す¹⁾。

一方、セラミックスの誘電率は通常のアルミナで8.5~9.8ぐらいの値を示し、アルミナの純度に比例して大きな値となり、100%純度のアルミナでは10を越える誘電率を示す。ベリリアは6.5でセラミックスの中では比較的低い値を示すが、コーディエライトは5.3と最も低いクラスの値を有する。ムライトは、アルミナとコーディエライトの中間の誘電率を持つ。セラミックスの $\tan \delta$ は、 10^{-4} のオーダーであり、アルミナの場合は、誘電率と同様に純度によって変化し、 $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$

の値となる。

ガラスの熱伝導率は概して、セラミックスよりも低い値を示す。Table 1に見られるようにセラミックスはガラスに比べ10~500倍も高い熱伝導率を有する。特に窒化アルミニウムは金属アルミニウムを超える高い熱伝導率を持っている。この性質はガラスにはないものである。

強度も良く知られているように、セラミックスが高い値を示す。アルミナとバイレックスガラス®との比較では約6倍ほどアルミナが強い値となる。

熱膨張係数はガラスの種類によってかなり異なっている。シリコン素子に近い $3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ から $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ くらいの範囲のものがある。セラミックスは一般にガラスに比べ高い熱膨張係数を示すものが多い。コーディエライトのように極めて低い値を示すセラミックスもあるが、強度などの性質もガラスに近い値となる。

3. セラミックスへの要求

電子機器の性能向上にともなってセラミックスに対する要求も次第に高度で複雑なものとなつてくる。特にセラミックス基板の世界ではこの傾向が強い。Fig. 2はコンピュータの冷却系の様子を示している。LSIチップの熱は基板を介さず直接

水を使用して冷却系へと伝達される。セラミックの有する高い熱伝導率はこのような冷却系では、あまり重要度が高くない。一方、ピングリッドアレイや従来のDTP型セラミックパッケージではLSI放熱は少なからずパッケージを介して行われるので高い熱伝導率が要求される。しかし、LSIが多数個搭載されるような基板では前者のような冷却系が採用されることが多く、基板としては信号を高速伝播するために、誘電率の低いことが要求される。すなわち、LSIを多数個搭載するマルチチップパッケージでは、信号の流れる経路と熱の流れる経路が分離され、熱はチップから直接放熱する方式がとられ、基板はチップ間を高速信号で結ぶことが第一の役割となる。

このほかセラミック基板は、シリコンチップに近い熱膨張係数を有することが要求される。素子をより高密度に実装し、素子間の距離を短くして信号の遅れを減少させるとともに、基板上で高い集積度を実現するためである。このためにチップは、パッケージから取り出され、直接基板に搭載されることになり、チップとセラミック基板の熱膨張は一致していることが望まれる。この熱膨張の一致は、たとえばアでチップが搭載されなくても、ベアチップに近い実装形態であれば、パンプ等の接続端子が微少になるので接続端子へのスト

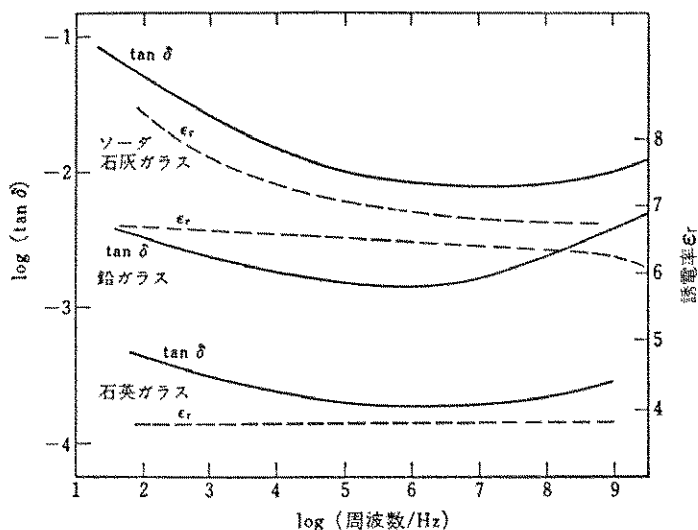


Fig. 1. いくつかの市販ガラスの誘電率と誘電正接 ($\tan \delta$) の変化

Table 1 ガラスおよびセラミックスの特性

材 料 名 称 主 成 分	ハイレックスガラス®		普通ガラス	サファイア	ア ル ミ ナ			ベリリア	窒化アルミニウム	
	(SiO ₂)	(SiO ₂)	(SiO ₂)	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃			BeO	AlN	
主 な 性 質	物理化学用ガラスとして良く知られており、普通ガラスと石英ガラスとの中間の性質とコストを示す。		窓板ガラス等に大量に使用されている。アルカリを多く含み、熱衝撃性も悪いので、電気絶縁材としては適さない。	アルミナの単結晶であり、アルミナ磁器より優れる、SOS用基板、マイクロ波絶縁体、光透過用に使われる。	酸化物系では最も機械的強度が優れており、熱伝導率・電気絶縁性・高周波損失・耐摩耗性・耐化学的性質が良好。99%アルミナは一般用および耐熱金属メタライズ用、96%アルミナは厚膜用基板および特に機械強度を必要とする用途、99.5%アルミナは薄膜用基板および特殊用途。			セラミックスの中では熱伝導率が高く、半導体の放熱板に適する。高温の電気絶縁性も優れている。毒性有り。	金属アルミニウムを越える熱伝導率を有し、アルミナに代わるパッキング材として期待されている。	
	見 掛 比 重	[g/cm ³]	2.23	2.47	3.98	Al ₂ O ₃ 92%	Al ₂ O ₃ 96%	Al ₂ O ₃ 99.5%	2.80	3.26
	圧 縮 強 度	[kg/cm ²]	6,500	—	71,000	24,000	25,000	37,000	15,000	23,000
	曲 げ 強 度	[kg/cm ²]	560	490	7,000	3,200	3,500	5,000	1,750	4,000~5,000
	弾 性 係 数	[kg/cm ²]	6×10 ⁴	7×10 ³	3.9×10 ⁶	3.1×10 ⁶	3.1×10 ⁶	3.9×10 ⁶	3.0×10 ⁶	28×10 ⁶
	熱 膨 張 係 数 〔×10 ⁻⁶ ・℃ ⁻¹ 〕	25—300℃	3.5	9	7.8	6.6	6.7	6.8	6.8	4.5
		25—700℃	—	—	8.7	7.5	7.7	8.0	8.4	
	熱 伝 導 率 [cal・cm/s・cm ² ・℃]	25℃	0.002	0.11	0.040	0.052	0.075	0.09	0.620	0.72
		300℃	—	0.0039	0.025	0.030	0.038	—	—	
	破 壊 電 圧 [kV/mm]	20℃	>10 ¹⁶	1×10 ¹²	>1×10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴ 25℃
300℃		1×10 ⁷	2×10 ⁶	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	3.1×10 ¹¹	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴		
T _g 値* [℃]	500℃	—	1×10 ³	1×10 ¹¹	3×10 ⁴	4.0×10 ⁹	1×10 ¹²	1×10 ¹³		
	誘 電 率	500	340	1,214	960	1,000	>1,000	>1,000		
電 力 率 (tanδ)	1 MHz	4.6	7	10.5	8.5	9.0	9.8	6.5	8.8	
	1 MHz	0.005	0.009	<0.0001	0.0005	0.0003	0.0001	0.0001	0.001	

レスを最少にすることが求められ、これを満足させるため熱膨張差を最少に抑えることが望まれるのである。

セラミックス基板に対する次の要求は、機械的強度ならびに寸法安定性である。破壊し易いチップを支える基板として十分な強度と寸法安定性が求められる。

ここで、セラミックスへの要求をもう一度用途別に整理してみたい。

(1) 大型高速コンピュータ

大型高速コンピュータの使命は、高速演算である。このために次のような優先順位で要求があるとされる。

- a. 低誘電率
- b. 低熱膨張
- c. 低抵抗・微細配線
- d. 強度

従来のセラミックス材料はアルミナが主流であるが、アルミナの9~10の誘電率、シリコンの2倍の熱膨張、モリブデンあるいはタングステンの高抵抗配線では、今後の基板材料としての要求を十分に満足することが困難になりつつある。

(2) ハイブリッド用基板

ハイブリッド用基板に対しても、上記の高速コンピュータ用基板と同様の性質が求められるが、素子の搭載方法によっては、高い熱伝導率が重要

な項目となる。また、コンデンサーや、抵抗を内蔵して基板の機能を向上させようという目的に対しては、誘電体や抵抗体との同時焼結に都合の良い1000℃以下の焼結温度が求められる。この条件は、高速コンピュータ用基板への要求事項に示した低抵抗・微細配線をも可能にする。融点が1000℃以下の銅あるいは金といった低抵抗導体との同時焼成ができるようになるからである。従来のアルミナでは焼結温度が1600℃付近と高いために、これらの導体は溶けて蒸発あるいは球状になって、配線としての形状は失われる。

4. ニューガラス（複合ガラス）

ガラスとセラミックスを複合したニューガラスは、上記の多くの要求事項を満足する材料として誕生したものである²⁾。Fig. 3に示したように、この材料は単純に、ガラスマトリックス中にセラミック粉末が分散した微構造となる。すなわち焼結の過程でガラスとセラミックスによる新たな結晶相が生成されない条件下では、ガラスとセラミックスの体積分率でニューガラスの性質を制御できる³⁾。

ガラスにほうけい酸ガラス、セラミックスにアルミナを用いたときの、アルミナの含有量と誘電率および最適焼結温度との関係をFig. 4に示す。アルミナの量が50 wt %付近に誘電率が低く、

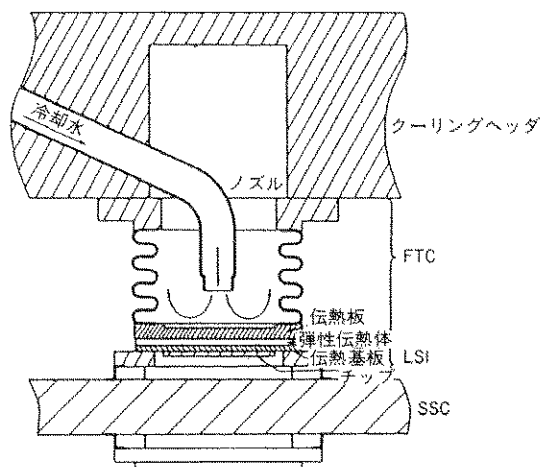


Fig. 2. 伝導冷却機構の概略

Table 2 ほうけい酸ガラス+アルミナ複合ニューガラスの特性 (代表例)

項目	特性
誘電率 (1 MHz)	5.6
熱膨張係数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	4×10^{-6}
曲げ強さ (MPa)	200
熱伝導率 (W/mK)	2.5

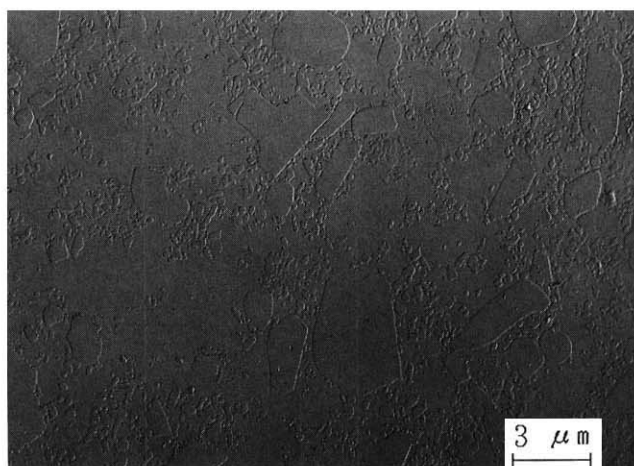


Fig. 3. ニューガラスの微構造：ほうけい酸ガラス+アルミナの複合ニューガラス

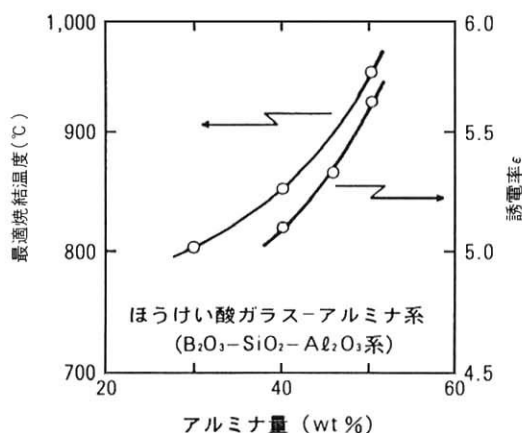


Fig. 4. アルミナ量と最適焼成温度ならびに誘電率の関係

1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下で緻密化する組成が求まる。しかし、アルミナに代えて、例えばコーディエライトをセラミック質として使用すると、クリストバライトが生成され、誘電率は期待値とあまり差はないが、

熱膨張係数が大幅に変化する。これは、クリストバライトの低温相・高温相の転移によるもので、シリコンの約5~6倍の値の平均熱膨張係数(20 $^{\circ}\text{C}$ ~300 $^{\circ}\text{C}$)となる。上記のアルミナの場合は、クリストバライトの生成はない。この理由は、アルミナがガラスマトリックス中へ拡散し、クリストバライトの結晶化を抑制しているためと考えられる。ほうけい酸ガラスとアルミナによるニューガラスの代表的な特性をTable 2に示す。強度については、従来のアルミナ基板やアルミナパッケージ等に比べて、ガラスとの複合化によって若干低い値となっている。この200 MPa程度の強度が基板等への応用に対して、どれ位の安全度があるか不明であるが、多層基板への応用では、ハンドリングや信頼性テスト上問題になるようなことはない。今後ニューガラスがどの位の強度であれば十分なのかは、アルミナとの比較ではなく検討されるべきだと考える。

ここで取り上げている系のニューガラスについて

ては、すでに本誌で低温焼成基板として、その材料組成が紹介されているので参照されたい⁴⁾。

5. ニューガラス応用

ガラスとセラミックスを単純に複合化したニューガラスの応用について2~3の例をここで挙げる。

5.1 高速コンピュータへの応用

ほうけい酸ガラスとアルミナによるニューガラスは、スーパーコンピュータ VP 2000 シリーズの基板に应用されている (Fig. 5)⁵⁾。この基板は MLG (Multilayer Glass Ceramic Board) と呼ばれる多層基板であり、その主要諸元を Table 3 に示す。MLG は、誘電率がアルミナと比べ低いた

め、パタン上の信号伝播速度が 80 ps/cm が得られ、アルミナ基板の場合の 100 ps/cm に比べ約 20 % の高速化が達成されている。また、最適焼結温度が 1000℃ 以下にあるため、配線導体として銅の使用が可能になっている。銅配線の採用により直流抵抗は 100 mΩ/cm と従来のタングステン導体に比べ約 1/5 と小さい値となった。

MLG の外形寸法は 245 mm 角で従来の樹脂プリント板並に大きい。層数は最大 61 層であり、これに含まれる信号層は 36 層である。これ以外は、電源およびグランド層となる。1 層あたりの厚さは約 200 μm となっており、61 層の基板の厚さは 13 mm である。信号層には約 40000 本の配線を収容し、配線長の合計は 1 km ほどになっている。

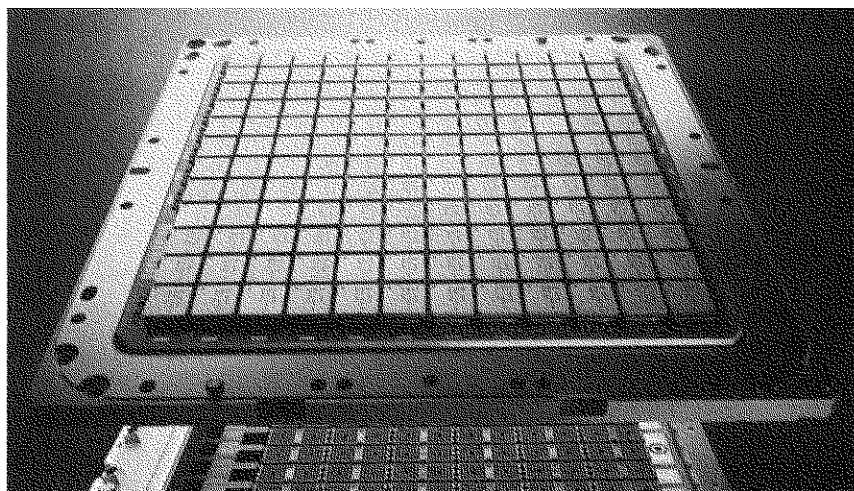


Fig. 5. スーパーコンピュータ VP 2000 シリーズの CPU 実装

Table 3 MLG の主要諸元

項目	諸元
外形寸法	245 mm×245 mm
基本グリッド間隔	0.45 mm
層数	61 層 (うち、信号 36 層)
板厚	13 mm
LSI 搭載個数	最大 144 個
誘電率	5.7
パターン幅	95 μm
パターン総延長	1 km

配線パターン特性インピーダンスは $65\ \Omega$ であるが、クロストーク雑音の低減と特性インピーダンスの均一化のために、信号2層を単位としてグラウンド層と電源層で挟んでいる。

セラミック基板の表面は、焼成時の収縮率変動を補正するためと、表面のマイクロクラックなどの微細欠陥に起因する強度低下を防ぐ目的で、ポリイミド層を絶縁体とする薄膜層を設けている。また、薄膜層の表面には部品搭載ならびにワイヤリング用のパッドを形成している。

MLGにはLSIチップを 12×12 の配置で計144個搭載できる。LSIとして15000ゲートの論理素子を適用すると、MLG基板上で最大2百万ゲートの高集積化が可能となる。この基板の裏面には $65\ \Omega$ 終端用の抵抗モジュールを312個実装している。抵抗モジュールとMLG基板との接続はSn-Pbバンプを介して行われる。この方法では、従来のフラットリード型の抵抗モジュールと比較して、ノイズやインダクタンスを大幅に低減できる。MLG基板裏面にはこの他、表面のLSI搭載位置に対応する144個所にLSIあたり60本合計8640本ピンを取り付けている。ピンの配列は1.8mmピッチであり、信号には4320本使用可能となっている。

スーパーコンピュータVP2000に用いられた

ほうけい酸ガラスとアルミナから成るニューガラスの熱伝導率は、アルミナの熱伝導率に比べ1/5程度低い。しかもLSIの発熱量は1チップあたり30Wで、MLG基板全体としては抵抗モジュール発熱も加わって、4.6kWとなり強制空冷や基板を介してヒートシンクする方法では十分な冷却効率が得られない。基板にアルミナよりも高い熱伝導率の材料を用いたとしても十分な冷却効率は得られないと推察される。

VP2000ではFig. 6に示すようなCCM冷却構造により高い冷却効率を可能にしている。この構造はFACOM M-780ですでに採用された伝導冷却技術を基本にして、LSIのPNジャンクションから冷媒（水）までの熱抵抗を1/4に低減させている。すなわち前述したように熱はMLG基板を介さずに、LSIから直接伝導で外へ取り出されるので、基板特性として高い熱伝導率が必要条件とならないのである。

5.2 CR内蔵多層基板への応用

民生用の電子・電気機器では、小型高機能・多機能化に対応する方法として、多層基板中にC（コンデンサ）やR（抵抗）を内蔵することが行われつつある。この傾向は大型コンピュータの基板にも見られるが、応用としてはまだ見あたらないようである。

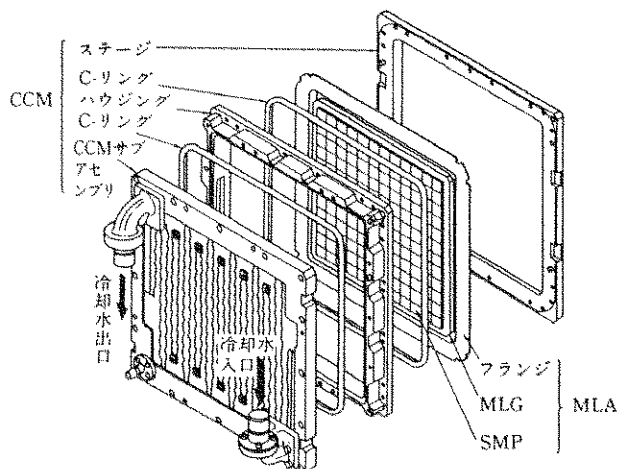


Fig. 6. VP2000のCCM (Conductive Cooling Module)

CR 内蔵型多層基板に用いられたニューガラスは、粒径をコントロールしたアルミナと鉛ほうけい酸ガラスを複合化した組成である⁹⁾。その組成比率はアルミナ 55 wt %、鉛ほうけい酸ガラス 45 wt %で、誘電率は 7.5 で曲げ強さは約 30 MPa と高い値を示す。焼成条件は 900℃ 大気中である。この CR 内蔵型多層基板の材料についての一例を Table 4 に示した。誘電体材料は、多層基板に内蔵し同時焼結したもので誘電率 7000 を達成している。抵抗材料は材料の組成によって抵抗値を調整することが可能であり、10 Ω/□から 1 MΩ/□までの抵抗素子を得ることができるとされている。その温度係数も ±200 ppm/℃ 以内に制御できるとされている。この CR 内蔵多層基板は、電圧制

御型水晶発振器に応用されているが、従来の個別部品を搭載した水晶発振器に比べて、寸法で 1/10、重量で 1/3 の小型軽量化を実現している。

5.3 その他の応用

本文で取り挙げた低誘電率のニューガラスは、高速コンピュータ以外的高速信号伝播を必要とする基板に適用が可能である。例えば、この材料を用いて、Gbit/s レベルの高速光伝送用基板にも適用すると大幅な低損失化が図れる。Fig. 7 は銅パターンを用いたニューガラスと従来のタングステンパターンのアルミナそれぞれの基板における電送損失と周波数の関係を求めたものである。損失の測定法としては、信号ラインを上下グランド層で挟んだトリプレート方法により行っている。

Table 4 CR 複合基板用材料例

	材料の種類と組成
基板	アルミナ/ほうけい酸鉛ガラス=55/45
小容量容量素子	同 上
大容量容量素子	$\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})_{0.67}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})_{0.33}\text{O}_3$
抵抗素子	RuO ₂ 系厚膜用抵抗体ペースト
導体配線	Au, Ag-Pd, Ag Au-Pt (パッド用) など

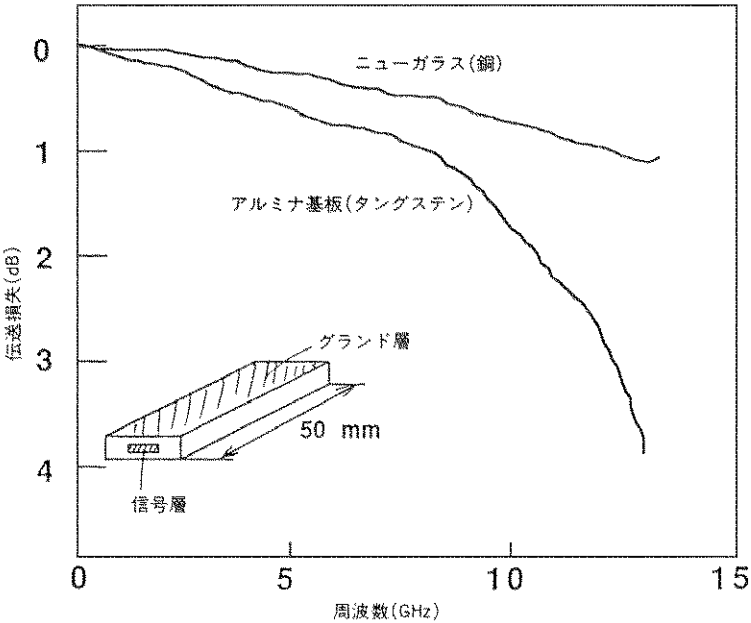


Fig. 7. 伝送損失の比較

アルミナ基板では、10 GHzを超えたあたりから急激に損失が大きくなり12~13 GHzではニューガラスの3~4倍と大き値となる。ニューガラスは5 GHz付近でもアルミナの半分ほどの損失となる。これらの差は誘電率とパターンの導体抵抗の違いから生ずることがシミュレーションの結果からも確認されている⁷⁾。

6. おわりに

ガラスとセラミックスを複合化させたニューガラスについて述べた。この材料については筆者らはガラスセラミックスあるいは複合セラミックス等々色々な呼び方をしている材料である。この種の材料の誕生はアルミナやパイレックスガラス[®]等に比べればはるかに歴史が新しく、未知の事象も多い。それだけ応用の面でも研究の面でも、非常に興味深い材料ということができる。今後もニューガラスとしての発展を強く望むところである。

参考文献

- 1) 大井喜久夫, 中村輝太郎訳, D. G. Holoway「ガラスの物理」共立出版 (1977)
- 2) K. Niwa, Y. Imanaka, N. Kamehara, and S. Aoki: Advances in Ceramics, Vol. 26, "Ceramic Substrates and Packages for Electronic Applications" Ame. Ceram. Soc. (1989), p. 323
- 3) 今中佳彦, 青木重憲, 亀原伸夫, 丹羽絃一: 窯業協会誌, Vol.95 (1987), p.1119.
- 4) 西垣進: NEW GLASS, Vol.4, No.2(1989), p.37.
- 5) 金子明, 瀬山清隆, 鈴木正博: 雑誌 FUJITSU, Vol.41, No.1 (1990), p.12.
- 6) 電子材料工業会編:「機能回路用セラミックス基板」, 工業調査会 (1985)
- 7) K. Niwa, H. Suzuki, H. Yokoyama, N. Kamehara, K. Tsubone, H. Tanizawa, and H. Sugiki: 1989 Talk Summaris Electronic Div. Ame. Ceram. Soc. Annual Meetig (1989; April), 63-S111-89.

〔筆者紹介〕



丹羽 絃一 (にわ こういち)
 昭和39年 千葉大学物理学科卒
 同年株式会社富士通研究所入社
 昭和54年 同研究所材料研究部研究室長
 昭和60年 同研究所無機材料研究部部長
 工学博士

Abstract

Developments and applications of glass-ceramic composite "new glass materials" are introduced. New glass materials composed of borosilicate glass and alumina has a low dielectric constant, low thermal expansion coefficient and low sintering temperature which will satisfy the requirements for electronic application. In the high speed computer system, the most important property is dielectric constant. The dielectric constant directly related to the propagation speed of signals. And the thermal expansion coefficient is also important for high density direct chip packaging on circuit boards. Low firing temperatures of the new glass allow to use the high conductivity conductors such as gold and copper.

The new glass of borosilicate glass-alumina composite has been applied to VP 2000 series supercomputer. Capacitors and resistors have been co-fired with the new glass materials that made the system compact and high speed.