

Development of AlN Substrate with High Thermal Conductivity



横井 誠

Makoto Yokoi

ハイテク研究所 新素
材研究センターセラミ
ックグループ 主任研
究員(掛長)



金丸 孝男

Takao Kanemaru

ハイテク研究所 新素
材研究センターセラミ
ックグループ 主任研
究員(掛長)



熊谷 正人

Masato Kumagai

ハイテク研究所 新素
材研究センターセラミ
ックグループ 主任研
究員(課長)・工博



中野 正

Tadashi Nakano

ハイテク研究所 新素
材研究センターセラミ
ックグループ 主任研
究員(掛長)



船橋 敏彦

Toshihiko Funahashi

ハイテク研究所 新素
材研究センターセラミ
ックグループ 主任研
究員(課長)



吉井 裕

Yutaka Yoshii

ハイテク研究所 新素
材研究センターセラミ
ックグループ 主任研
究員(課長補)

1 緒 言

電気機器の高速化、小型・軽量化、高信頼性化への要求が高まるにつれて、半導体素子は大型化、高集積化、高出力化の方向に、また配線回路は微細化、配線長さの短縮化、低抵抗化の方向に急速に進んでいる。これに伴い、半導体素子を搭載する基板に求められる特性もますます高度化、多様化してきている。

とりわけ、素子の高集積化、高出力化による発熱量の増大は深刻な問題であり、適切な放熱方法を工夫しないと素子の動作不良や信頼性低下が著しくなる。放熱の方法としては、①冷却ファンをつける、②強制空冷、水冷機構をつける、③高熱伝導性基板を用いるなどの方法が考えられるが、小型・軽量化の可能な高熱伝導性基板への要求はとりわけ高くなっている。一方で、素子の大型化に伴って、半導体素子(特に、Si)と基板の熱膨張のミスマッチによる使用時の熱応力、クラックの発生の問題も大きくなってきており、素

要旨

次世代の IC 基板として期待される AlN 焼結体を製造する技術を開発し、AlN のメタライズ技術、応用についても検討した。開発した AlN 焼結体は、高純度、特に低 O で微細な AlN 粉を用い、基板製造過程でこれら不純物をさらに低減し、粉成長を促進させ、気孔を完全に除去することにより 180 W/m・K 以上の高熱伝導率を安定して確保できる。有機結合剤、成形、脱脂、焼成法の開発により量産性の高い基板製造が可能となった。開発した AlN 基板はその高熱伝導性、Si に近い熱膨張性という特長を生かして、半導体素子の高集積化、高出力化、大型化に対応できる。AlN のメタライズ技術も実用化レベルに近づいており、今後の用途拡大が期待できる。

Synopsis:

Aluminum nitride (AlN), an attractive candidate for the high performance substrate of the next generation, has been developed, and metallization techniques have also been advanced. High thermal conductivity AlN substrate with more than 180 W/m・K has successfully been obtained by using high purity, especially low oxygen content AlN powder, and by decreasing impurities, attaining grain growth and eliminating pores completely in the sintered body. Development of an excellent organic binder, tape casting, binder burn-out and the sintering process has resulted in the highly efficient manufacture of the AlN substrate. AlN is a suitable substrate for mounting highly integrated, high power and large-sized semiconductor devices. With the above mentioned development of the manufacturing process and metallization techniques, large-scale practical applications of the AlN substrate have been expected.

子の信頼性低下を引き起こしている。このため、Si にできるだけ近い熱膨張率 ($3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を有する基板への要求も高い。これらのニーズに応えるべく、セラミックス系の材料を中心に種々の材料の開発が進められている¹⁾。

本報では、当社で開発を進めてきた AlN 基板について、焼結機構の解明、高熱伝導化を達成するための微構造制御技術の検討、および基板へのメタライズ特性調査を進めてきた結果について述べる。

2 セラミックス基板の技術動向

2.1 現状と問題点

IC 基板材料はプラスチック、セラミックス、金属系複合材料の 3 つに大別できる。これらの基板材料に求められる特性としては、①絶縁抵抗が大きい、②絶縁耐圧が大きい、③誘電特性が良い、④

* 平成元年 8 月 25 日原稿受付

Table 1 Typical properties of high thermal conductivity ceramic substrates

		Al ₂ O ₃	AlN	SiC	BeO	c-BN
Thermal conductivity (RT)	(W/m·K)	20	100~180	270	250	1 300
Electrical resistivity (RT)	(Ω·cm)	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁸	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴
Insulation voltage (RT)	(kV/cm)	100	140~170	0.7	100	100~140
Dielectric constant (RT·1 MHz)	ε	8.5	8.8	42	8.5	6.7
Dielectric loss (1 MHz)	(10 ⁻⁴ tan δ)	3	5	500	3	4~7
Thermal expansion coeff.	(10 ⁻⁶ /K)					
RT—200°C			3.5			
RT—400°C		7.3	4.5	3.7	7.3	7.2
Density	(g/cm ³)	3.9	3.3	3.2	3.9	2.9
Young's modulus	(10 ⁴ kg/mm ²)	3.7	2.8	4.0	3.7	3.2
Modulus of rupture	(kg/mm ²)	20~30	30~50	45	20~30	17~23
Sintering pressure		normal	normal	(hot pressing)	normal	ultra high
Additives		SiO ₂ , MgO	CaO, Y ₂ O ₃	BeO		

機械的強度が高い, ⑤成形性(寸法精度)が良い, ⑥耐熱性がある, ⑦熱伝導率が高い, ⑧熱膨張係数が周囲の材料とマッチしている, ⑨化学的安定性が高い, ⑩コストが低いことが挙げられる²⁾。以上の特性を考慮して各用途に適した基板材料が採用されているのが現状である。

セラミックスの中でもアルミナは上記条件にほぼ満足する材料として多用されており, セラミックス基板全体の 90% 以上を占めている。ただ, 電子機器の高速化, 小型・軽量化, 高信頼性化に伴って, 従来のアルミナ基板では対応できない用途も多くなってきている。そのため, 次世代の基板としては, 1つは高熱伝導性基板, 1つはコンデンサー, 抵抗を内蔵した低温焼結基板の2つの方向で開発が進められている。

2.2 高熱伝導性基板

高い電気絶縁性を有するセラミックスでは主にフォノンによって熱が伝えられる。Adamantin 構造単結晶の熱伝導率は次の理論式で与えられる³⁾。

$$\kappa = BM\bar{\theta}_D^3/T\gamma^2 \quad (1)$$

ここで, M : 単位格子の平均分子量

$\bar{\theta}_D$: 単位格子の中の1原子当たりの占有体積の立方根

θ_D : Debye 温度

T : 絶対温度

γ : Grüneisen 定数

B : 定数

$M\bar{\theta}_D^3$ の大きい物質, すなわち原子量が小さく, 原子間の結合が強く, かつ結晶構造が単純なものが高熱伝導性物質として有望である。

実際に使用あるいは開発されている主な高熱伝導性基板の特性をアルミナと比較して Table 1 に示す。ダイヤモンド, c-BN は特に高い熱伝導率をもち, 他の特性も基板として優れているが, 極めて高価であるなどの理由から半導体レーザー用ヒートシンクなどの限られた分野で用いられているにすぎない。SiC はアルミナに比べて熱伝導率, 熱膨張率で優れているが, 絶縁耐圧が低く, 誘電率が大きい欠点があるほか, 現状ではホットプレス法によってしか製造できないため, 低コスト化が難しい。BeO は高熱伝導性で, かつ電気的, 機械的, 化学的特性はアルミナと同等またはそれ以上であり, パワーデバイス, 高周波デバイス用基板として古くから使用されている。ただ, 強い毒性を持つため幅広い分野での使用にはおの

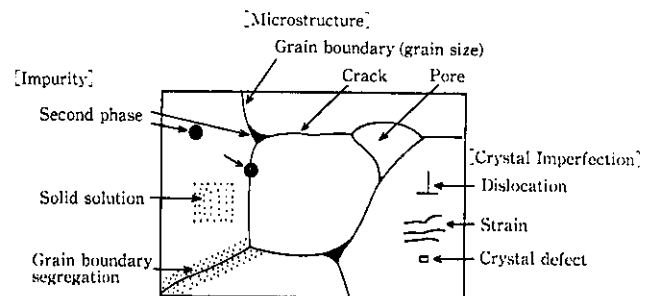


Fig. 1 Factors for decreasing thermal conductivity of ceramics (by H. Yanagida and S. Hishida⁴⁾)

ずから限界があるとされている。

これらの材料に比べて, AlN は熱伝導率, 熱膨張率でアルミナより優れており, 絶縁耐圧, 曲げ強度など他の電気, 機械的特性でもアルミナと同等またはそれ以上であり, バランスのとれた材料と言える。また, 製造面においても, AlN はシートの連続成形および常圧焼結が可能であり量産性の点でもアルミナと同等である。ただ, 実際に市販されている AlN 基板製品では, Fig. 1 に示したような種々の原因⁴⁾によるフォノンの散乱のために, 理論熱伝導率 320 W/m·K の 1/2 程度に値しか得られていないのが現状である。

高熱伝導性の AlN を再現性よく量産するためには, これらのフォノン散乱要因を除く必要があるが, とりわけ粒内への固溶酸素量, 粒界析出物, 気孔および粒界の隙間等を減少させることが重要である。

3 AlN 基板の製造方法

AlN は, アルミナ基板と同じ連続成形方法であるドクターブレード法により得たシートを常圧焼結することにより製造できる。ドクターブレード法^{5,6)}とは, セラミックス粉末, 分散剤, バインダー, 可塑剤および有機溶剤などからなるスラリーを, 移動するフィルム上に供給し, ドクターブレードと呼ばれるナイフ状のエッジを介して連続的に成形し, 乾燥後, 巻取り, 幅 1 m, 厚さ 1 mm 以下の薄いシートを製造する方法である。しかし, 有機バインダーの種類, 脱脂・焼成方法などはアルミナ基板の技術をそのまま適用でき

ないので、開発の上ではこれらの最適化により、量産が可能な技術確立した⁷⁾。

4 AlN の緻密化過程

AlN は難焼結材料であり、常圧下で焼結させるためには一般にアルカリ土類金属化合物、希土類金属化合物などの焼結助剤の添加が必要である^{8,9)}。これらの助剤を添加した場合の AlN の焼結機構は液相焼結である。すなわち、これらの添加物は、いずれも昇温過程で AlN 粒子の表面に存在する Al-O 系の化合物と反応し、液相を生成する。液相の存在により、物質移動・拡散・粒子の再配列などが進み、焼結が進行しやすくなる。緻密化に影響する因子としては、焼結温度、保持時間、昇温速度、圧力などが考えられるが、ここでは、その中でも特に重要な焼成時の雰囲気条件に注目した。焼結助剤として Y_2O_3 を添加した場合を例にあげ、AlN の焼結過程におよぼす焼成雰囲気の影響について述べる。

4.1 実験方法

AlN 粉末 (平均粒径 $0.8 \mu m$) に Y_2O_3 を添加し、シート成形、脱脂したのち、 $1550\text{--}1900^\circ C$ で 0—4 時間、常圧下・窒素気流中に焼結した。

焼成雰囲気は、還元雰囲気下と非還元雰囲気下で行い、両者の比較を行った。ここで用いた炉は黒鉛炉である。したがって、炉内雰囲気は還元性である。一方、容器材質の工夫等により還元雰囲気から脱脂体を遮閉した条件を、ここでは非還元雰囲気と呼ぶこととする。

4.2 実験結果と考察

Fig. 2 に還元、非還元雰囲気下、各温度での密度変化を示す。還元雰囲気下では、緻密化速度が遅く、完全に緻密化することはない。一方、非還元雰囲気下では、 $1800^\circ C$ 付近で急激な緻密化が起こり、 $1900^\circ C$ で緻密な焼結体が得られた。Fig. 3 に緻密化過程での成分変化を示す。Y 量は、いずれの雰囲気においても差異はなく変化しない。すなわち、Y の揮発は起こらないことがわかる。一方、酸素は還元雰囲気下の場合、 $1550^\circ C$ から特にその減少が顕著であり、 $1800^\circ C$ 以上では Y_2O_3 の酸素分としてしか存在しない。Fig. 4 および 5 に、両雰囲気下で焼成した場合の粒界相の変化を比較して示す。非還元雰囲気下では $1800^\circ C$ で液相成分である

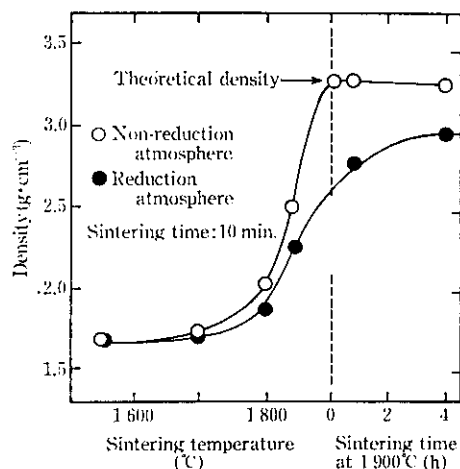


Fig. 2 Densities of AlN ceramics as a function of sintering temperature and time under different atmosphere

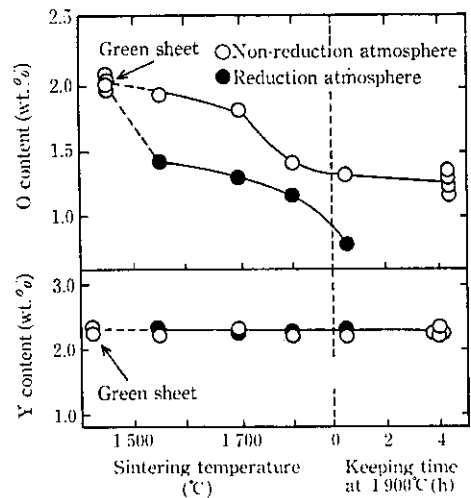


Fig. 3 Change in oxygen and yttrium content as a function of sintering temperature and keeping time

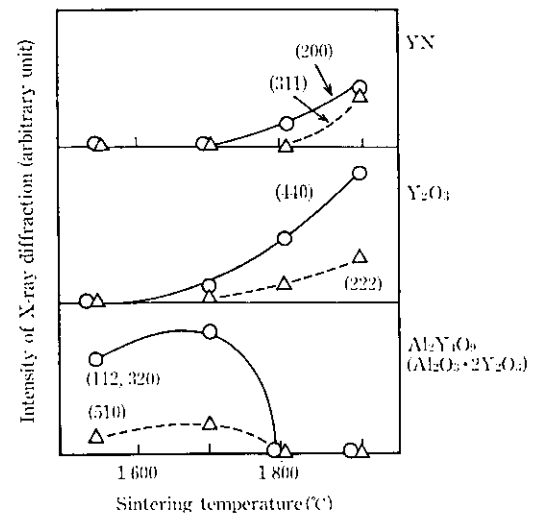


Fig. 4 Change in grain boundary phase of AlN ceramics as a function of sintering temperature under reduction atmosphere (sintering time: 10 min)

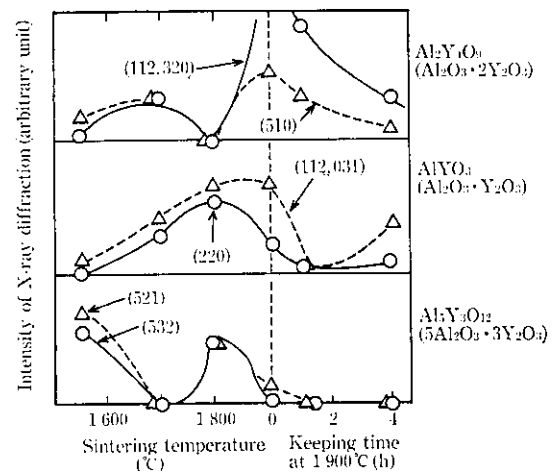


Fig. 5 Change in grain boundary phase of AlN ceramics as a function of sintering temperature under non-reduction atmosphere (sintering time: 10 min)

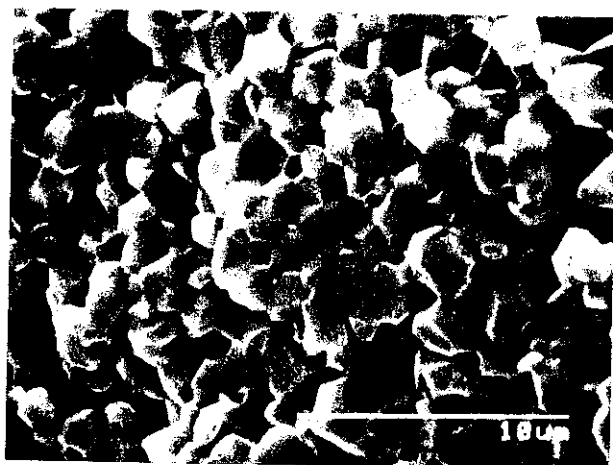


Photo 1 SEM micrograph of AlN after sintering under non-reduction atmosphere

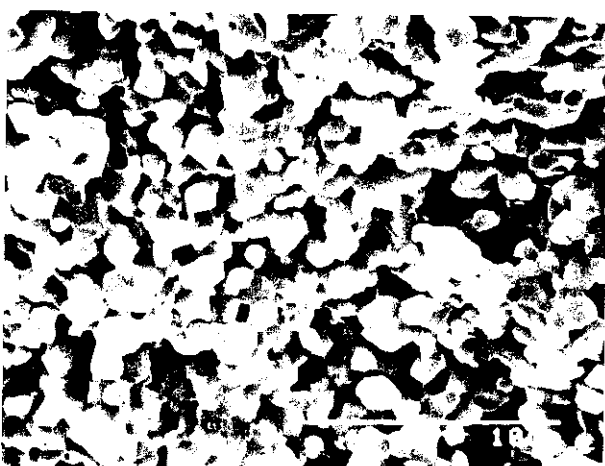


Photo 2 SEM micrograph of AlN after sintering under reduction atmosphere

$\text{Al}_2\text{Y}_4\text{O}_9$, Al_2YO_3 などの複合酸化物が、複雑な増減挙動を示しながら存在する。それに対し、還元雰囲気下では、液相成分がほとんど消失し、YN や高融点の Y_2O_3 が出現するのがわかる。Photo 1 および 2 に、 1850°C で焼成したサンプルの SEM による微構造を示す。非還元雰囲気下では、粒成長が進行し AlN の角ばった自形ができているのに対し、非還元雰囲気下では粒子が小さく、丸く、しかも気孔の存在が多くみられ、焼結の進行状況に大きな差があるのが認められる。

また、焼結過程における粒界の液相成分の組成値を以下の方法により推定した。すなわち、酸素分析値から求められる酸素が、すべて Al_2O_3 と Y_2O_3 の形で存在するとして (2) 式から Al_2O_3 量を求めた。

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 量} = \frac{102}{48} (\text{酸素分析値} - \text{Y}_2\text{O}_3 \text{ の酸素量}) \quad \cdots (2)$$

焼結過程での粒界の液相成分の組成値の変化を Al_2O_3 - Y_2O_3 系の状態図¹⁰⁾ 上にプロットすると Fig. 6 のようになる。すなわち、非還元雰囲気下では、複合酸化物の組成の変動が少なく、他の焼成条件では液相として存在できる組成であるのに対して、還元雰囲気下では、酸素の揮散により Y_2O_3 側に組成が変動することにより、液相が生成しないため、緻密化が阻害されると考えられる。

以上に示したように、液相が関与する場合には、炉内雰囲気は焼結機構に大きな影響を及ぼすため、適切な、しかも安定した雰囲気

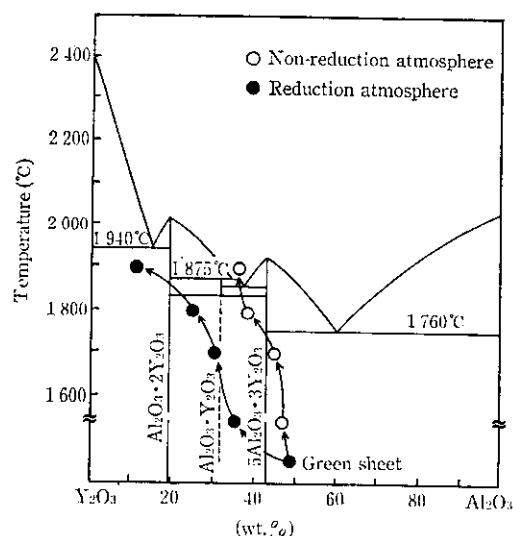


Fig. 6 Phase diagram of the system Al_2O_3 - Y_2O_3 (Plots represent changes in calculated grain boundary composition based on Eq. (2) as a function of sintering temperature)

条件を整えることが肝要である。

5 AlN 焼結体の高熱伝導化

2 章で述べたように、高熱伝導 AlN 焼結体を再現性よく得るためには、粒内への固溶酸素量、粒界析出物、気孔、および粒界の空隙を減少させるといった、いわばマクロからミクロにいたるまでの組織および構造を制御する技術が必要である。以下に実例をあげ、それらの方法の一端を示す。

Fig. 7 に AlN 焼結体中の酸素量と熱伝導率との関係を示す。AlN 焼結体中の酸素量が低いほど、熱伝導率は高くなる。含有酸素量が多いものは、AlN 格子中への酸素の固溶に起因するフォノンの散乱の増大¹¹⁾ や低熱伝導性の粒界析出物¹²⁾ のため熱伝導率が低下する。このことから AlN 焼結体の高熱伝導化の方策として以下のことがいえる。

- (1) 製造プロセスの中では、酸素のピックアップのできるだけ低い方法を取る。
- (2) 焼結のプロセスでは、緻密化が完了するまで液相焼結に必要な酸素を残存させ、その後は酸素を低減すること。

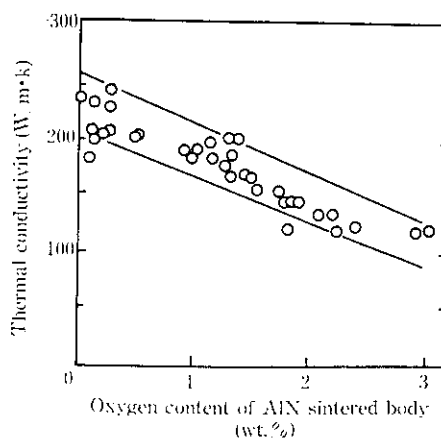


Fig. 7 Relation between oxygen content and thermal conductivity of AlN sintered bodies

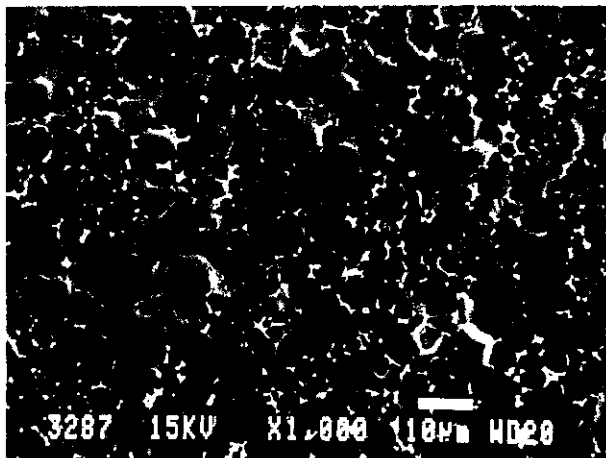


Photo 3 SEM micrograph of AlN (thermal conductivity 190 W/m·K)

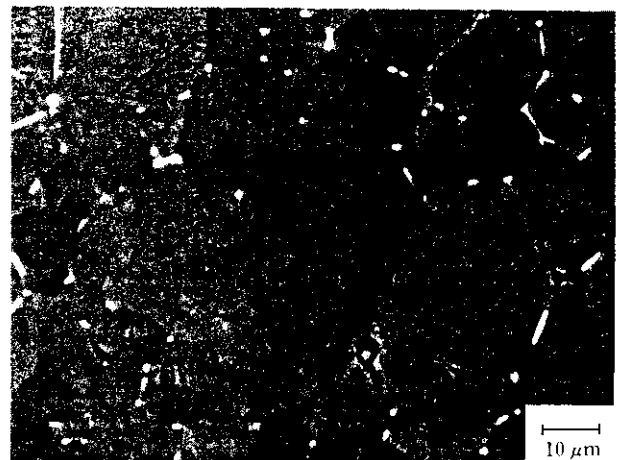


Photo 5 SEM micrograph of AlN: Thin grain boundary phase and large grain size (thermal conductivity 240 W/m·K)

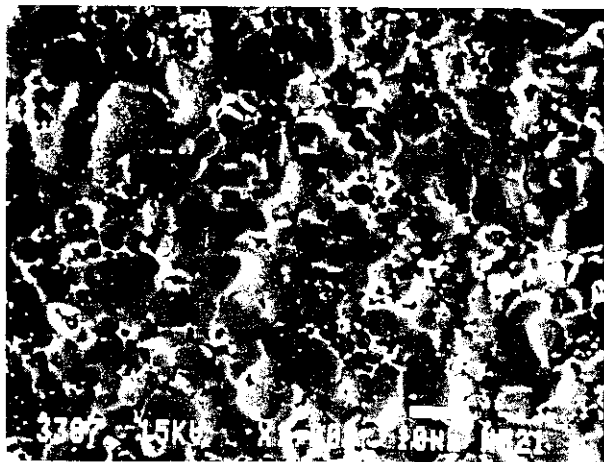


Photo 4 SEM micrograph of AlN: Grain boundary defect (thermal conductivity 160 W/m·K)

このほか、焼結助剤は、 Y_2O_3 や CaO に代表されるように、AlN 粒子内に分布する酸素原子を粒界に集めることにより、粒子内の酸素濃度を減少させ¹³⁾、フォノンの散乱を抑えるという働きがある。また、還元性の助剤 CaC_2 に代表されるように、焼結中に含有酸素量を低減させる働きも重要である¹⁴⁾とされており、適当な助剤を選定することが重要である。

このようにして、粉末、助剤の選定、脱脂、焼結条件など各製造プロセスの最適化を図ることにより量産製造技術を確立した。

この過程で得られた焼結体の微構造と熱伝導率との関係について以下に述べる。Photo 3 に、プロセスを最適化したときの微構造を示す。粒子の大きさがほぼ同一で、気孔もなく、粒界相も均一な分布をしている。このときの熱伝導率は、180~220 W/m·K と高い値を示した。Photo 4 に、同じような粒径ではあるが、粒界にミクロな空隙のある欠陥を持つ例を示す。この焼結体の熱伝導率は、やや低く 160 W/m·K であった。

Photo 5 に特殊な焼結法¹⁵⁾ を取ることで、粒界相がほとんど存在せず、粒が成長した焼結体の微構造を示す。これの熱伝導率は 240 W/m·K であった。

上述の例で明らかのように、特性のうちで特に重要な熱伝導率は微構造に敏感であり、いかにしてこれを再現性よく制御できるかということが、開発上のポイントであった。

Table 2 Properties of developed AlN substrate

Items	Properties
Thermal conductivity	180~220 W/m·K
Electrical resistivity (RT)	$>10^{14}$ $\Omega\cdot\text{cm}$
Thermal expansion coefficient (RT~200°C)	3.9×10^{-6} /K
Dielectric constant (ϵ) 1 MHz	8.9
Dielectric loss ($\tan \delta$) 1 MHz	4.9×10^{-8}
Insulation voltage	>30 kV/mm
Density	3.30 g/cm ³
Modulus of rupture	45 kgf/mm ²
Surface roughness (Ra)	<0.5 μm
Warping	$<0.1/50$ mm mm

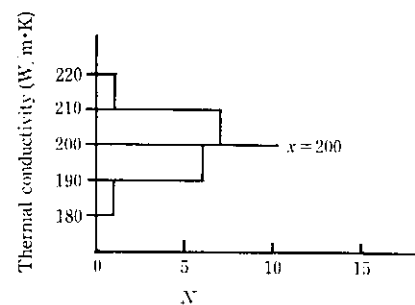


Fig. 8 Thermal conductivity distribution of developed AlN substrate

Table 2 に本開発により得られた高熱伝導 AlN 基板の特性値を一覧表にして、また熱伝導率の分布を Fig. 8 に示す。再現性よく高熱伝導性の基板が得られた。これらの特性のうち、焼成したままの面で、表面粗度と反りの小さい平坦かつ平滑な基板を得るためには、焼結方法の種々の工夫を要したが、厚膜印刷によるメタライジング用基板として、また銅張り接合基板用をはじめ多くの用途で十分特性を満たすとのユーザー評価を得ている。

6 AlN 基板のメタライズ

6.1 AlN に必要なメタライズ技術

AlN 板上に回路を形成するためのメタライズ方法には、アルミナ基板と同様、厚膜印刷法、銅板の直接接合法、高融点金属法、物理蒸着による薄膜形成法、無電解メッキ法等の技術が開発中あるいは実用化段階にある。

厚膜印刷法は、HIC 用に最も広く普及している方法で、Au, Pt, Pd, Ag などの金属粉末を含有する導体ペースト、導電性酸化粉が主体の抵抗ペーストおよびガラス粉末が主体の誘電体ペーストの3種を組み合わせて基板にスクリーン印刷したのち焼成し、回路を形成する方法である。低コストで大量生産に向き、かつ微細なパターンを形成できるのが特長である。

銅板の直接接合法は、銅箔をプリント配線板のように基板に直接接合する方法である。微細なパターンの形成は困難だが、高い熱伝導率を確保でき、パワートランジスタやサイリスタなど大電流を流す用途を中心に使用範囲が広がってきている。

高融点金属法は、Mo-Mn, W などの高融点金属の粉末をペースト化し、AlN のグリーンシートに直接印刷し、一体焼結する方法である。配線抵抗が高いという欠点はあるが、層間に配線を施した積層基板を作成するためには、このメタライズ方法が有効である。

物理蒸着は、真空蒸着、スパッタリングなどの方法で、特別に表面を平滑にした基板上に $1\mu\text{m}$ 以下の導体、抵抗体の薄膜を形成する方法である。非常に微細なパターンが起こせるのが特長である。

無電解メッキは、基板を表面処理した後、マスクレジストを用いて銅やニッケルの金属膜を無電解メッキで析出させる方法である。ただし、あまり厚い膜が得られない。

以上いずれの方法においても、酸化物であるアルミナ基板と窒化物である AlN 基板とでは、接合のメカニズムが異なってくると考えられ、強固で信頼性の高いメタライズを行うには、AlN 基板に合わせた技術の開発が必要である¹⁶⁾。

6.2 厚膜メタライズ

ここでは厚膜印刷法を例としてメタライズ技術の現状と課題を述べる。

6.2.1 厚膜導体形成

AlN はアルミナに比べて厚膜導体形成は概して困難である¹⁷⁾。アルミナ基板用のペーストを AlN にそのまま使用したのでは、以下の理由により、高い密着強度をもった焼成膜は得られない。

- (1) AlN は窒化物であるために、酸化物であるガラスとの濡れ性が異なる¹⁸⁾。
- (2) AlN と Al_2O_3 とでは熱膨張率に2倍近い開きがあり、 Al_2O_3 用に調整・最適化されたガラスでは、熱膨張率のミスマッチにより熱応力を生じ、界面に欠陥を生じやすい。

- (3) アルミナ用に優れていると言われるペーストには、一般に大量の Bi_2O_3 が含まれるが、これは焼成時に AlN と反応して気泡を生じてしまう。

ところが、最近になって AlN に使用可能という導体ペーストが各ペーストメーカーによって開発され、何種類か入手もできるようになった。そこで、これらのうちミックスボンドタイプ (A ペースト)、フリットタイプ (B ペースト) およびダイレクトボンドタイプ (C ペースト) の3種のペーストを用いて実験を行った。

これらのペーストを焼成し、シート抵抗、ハンダ濡れ性、ハンダ食われ性、密着強度を測定した結果を Table 3、そのエージング試験の結果を Fig. 9 に示した。この結果より、エージング後の強度低下に若干の問題を残しているものの、ハンダ特性、密着強度ともに実用的なレベルに近いものが得られてきていると言える。

6.2.2 厚膜抵抗体形成

抵抗体のペーストも、導体と同様、フィラー、ガラスおよびビヒクルを混練して作られるが、導体と大きく異なる点として、ガラスの含有量が導体に比べて多いことである。

一般のアルミナ用抵抗ペーストは、濡れ性を上げるために、ビスマス含有量の高いガラスを用いるが、このようなガラスを AlN に使用すると、焼成温度付近で AlN と反応して N_2 ガスの発生による発泡が起こってしまう¹⁹⁾。発泡の起こった抵抗体厚膜は、抵抗値のバラツキ、断線等の致命的な欠陥を生じる。この現象は、特にガラス含有量の高い高抵抗用ペーストに著しい²⁰⁾。

このような問題点を克服するためには、低反応性の結晶化ガラスを使う方法¹⁹⁾、または AlN 基板表面を酸化処理して従来ペーストを使用する方法などがある²⁰⁾。

ここでは、結晶化ガラスタイプの抵抗ペースト (試作品) を用

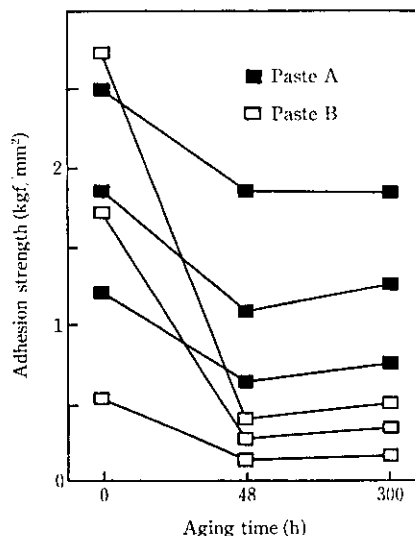


Fig. 9 Aging effect on adhesion strength of conductive thick film

Table 3 Characteristics of thick film conductor fired on AlN substrates

	Sheet resistivity ($\text{m}\Omega/\square$)	Solder leach* (cycle)	Solder Wet**	Adhesion strength (kg/4 mm²)		
				Ave	Min	Max
PASTE A	18.0	4	>96%	3.70	2.39	5.00
PASTE B	4.1	1	>95%	3.43	1.05	5.47
PASTE C	15.6	0	>96%	1.03	0.70	1.81

* 290°C Sn60-Pb40 solder dipping cycles

** Coverage after 230°C Sn60-Pb38-Ag2 solder dipping

Table 4 Characteristics of thick film resistor fired on AlN substrates

	Resistance (Ω)				Low TCR -55~25°C (ppm/K)	High TCR 25~125°C (ppm/K)
	1 mm×0.5 mm	1 mm×1 mm	1 mm×2 mm	1 mm×4 mm		
10 Ω /□	4.7±0.2	13.7±1.1	33.9±1.9	76.1±1.7	181	181
100 Ω /□	20.5±0.7	74.6±3.7	206.2±6.5	521.8±5.2	18	36
1 k Ω /□	240.1±6.2	1 093±30	33.9±1.9	76.1±1.7	29	27
10 k Ω /□	2 624±240	11 850±330	41 490±140	112 700±8 900	~99	-97

い、実際に抵抗体のパターンを印刷して抵抗値の再現性、温度特性等を測定した結果を一例として示す。結果を Table 4 にまとめた。ここで使用した抵抗体は 10 k Ω /□ 以下のものであるが、端面効果によると思われる抵抗パターンのアスペクト比による抵抗値の変動は若干大きいものの、再現性、温度特性も良好であり、実用的にも十分であろう。

この他、他種ペーストや、より高抵抗側では再現性・温度特性とも十分なものは得られなかった。

6.2.3 厚膜印刷法の展望

以上の結果を総括すると、導体、抵抗体ともに今後改良すべき余地は残されているものの、用途によっては実用的なレベルに達していると言える。

厚膜印刷による AlN のメタライズの今後には、2つの方向があると思われる。第1は、さらに高信頼・高強度の導体ペーストと抵抗値再現性・温度特性の良い抵抗体シリーズの開発を進めることである。当初は不可能と見られていた AlN メタライズ用のペーストが、現実には少しずつ試作されつつあり、本稿で示されたように完全ではないが、実用的なレベルに達している。基板の直接メタライズができれば、低コストでしかも熱伝導率を損わずに済む。この方向でのペーストメーカー各社のより一層の研究努力を期待したい。

第2の方向は表面酸化処理等の方法により、従来のアルミナ用ペーストでもそのまま使用可能とすることである^{18,20)}。こういった目的での表面処理技術については、現在活発に研究が進められている。実用化できれば、既存ユーザーの印刷・焼成条件等の操作条件を変更しなくても済むという点で有利な方法であろう。

7 AlN 基板の特長とその応用

当社で開発した AlN 基板の特長をまとめると以下のようになる。

- (1) 通常焼成により 180 W/m·K 以上、特殊な焼成法をとることにより 240 W/m·K の高熱伝導率を再現性よく達成できる。
- (2) 熱膨張率が $3.9 \times 10^{-6}/K$ と Si ($3.5 \times 10^{-6}/K$) に近く、大型素子の搭載が可能である。
- (3) 他の電気的・機械的特性がアルミナと同等またはそれ以上である。

AlN はその高放熱性、Si に近い熱膨張性という特長を生かしてすでに下記分野での応用が進んでいる。

- (1) 半導体レーザー用放熱チップ
- (2) インバータ、サイリスタ用放熱基板
- (3) 高周波パワートランジスタ用基板

今後、AlN 基板がさらに市場を拡大して行くためには、高密度実装基板および厚膜 HIC 基板として、あるいは高周波パワー IC 用を中心とするパッケージ分野での実用化の進展が重要と考えられる。

8 結 言

高熱伝導性をはじめ、IC 基板としての優れた特性を有する AlN 焼結体を再現性よく量産する技術および AlN へのメタライズ技術を開発してきた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 高純度、微細な AlN 粉末、有機バインダー、脱脂、焼成技術の開発により、180 W/m·K 以上の熱伝導率を有する基板を再現性よく製造する技術を確立した。
- (2) 高熱伝導率を達成するためには、下記の点が特に重要である。
 - (a) 高純度、特に低 O の AlN 粉末を用い、かつ基板製造プロセスでこれらの不純物をさらに低減される。
 - (b) 焼結過程での粒成長を促進させる。
 - (c) 焼結体内の気孔を完全に除去する。
- (3) アルミナ基板で確立されたメタライズ技術（厚膜法、薄膜法など）をもとに、AlN 基板に適したメタライズ技術を開発しており、一部は実用化段階に達している。

参 考 文 献

- 1) 電子材料工業会編：「機能回路用セラミックス基板」，(1985)，[工業調査会]
- 2) 柳田博明，菱田俊一編著：「セラミック基板材料データ集」，(1985)，11-20，[サイエンスフォーラム]
- 3) G. A. Slack: *J. Phys. Chem. Solid.*, **34** (1973), 321-335
- 4) 篠崎和夫，柘植章彦：化学と工業，**37** (1984) 9, 628-630
- 5) 例えば，斎藤勝義：セラミックス，**18** (1983) 2, 93-102
- 6) 例えば，加藤正利：工業材料，**31** (1983) 12, 34-38
- 7) 川崎製鉄(株)：特願昭 63-279426
- 8) K. Komeya and H. Inoue: *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **70** (1971), 107-113
- 9) 井上 寛，柘植章彦，米屋勝利：「窒化アルミニウムの焼結に及ぼす各種添加物の影響」，昭和48年粉体粉末冶金協会秋季大会講演概要集，(1973)
- 10) E. M. Levin, C. R. Robbins, and H. F. McMurdie: "Phase Diagrams for Ceramists 1969 Supplement", (1969), Fig. 2344, [The American Ceramic Society]
- 11) G. A. Slack: *J. Phys. Chem. Solid.*, **34** (1973), 321-335
- 12) K. Shinozaki, et al.: *Amer. Ceram. Soc.*, Fall Meeting, (1984)
- 13) 篠崎和夫，安斎和雄，高野武士，柘植章彦，米屋勝利：第24回窯業基礎討論会要旨集，(1986)，174
- 14) 黒川泰弘，内海和明，高見沢秀男：第24回窯業基礎討論会要旨集，(1986)，174
- 15) 川崎製鉄(株)：特願昭 63-194546
- 16) M. V. Coleman: *Proc. Int. Microelectron. Symp.*, **96** (1980) 13, 104-110
- 17) 秋本裕二：エレクトロニク・セラミックス，**11** (1988)，54-60
- 18) 黒光祥郎，吉田秀昭：資源素材学会全国大会，D-4，13-16
- 19) 石亀重春，藤村賢二，久保田 勉：HYBRIDS，**4** (1980) 4, 10-14
- 20) 黒光祥郎，吉田秀昭：「ガラスと Al_2O_3 及び AlN 基板との反応について」，日本セラミックス協会年会講演予講，(1988)，25