

窒化ケイ素絶縁放熱基板

1996年～現在

Key-words：窒化ケイ素、高熱伝導、パワー半導体

注1 パワー半導体は電力の制御や変換を行う半導体の総称で、パワーデバイスとも呼ばれる。エネルギーロスが少なく、環境負荷低減に貢献することができる。パワー半導体モジュールは複数のパワー半導体を1つのパッケージに集積した部品である。

注2 インバーターは主に直流電流を交流電流に変換する装置で、一方コンバーターは主に交流電流を直流電流に変換する装置。

パワー半導体は電気自動車や鉄道、産業機器、再生エネルギー用途に使われており、カーボンニュートラルの実現に向けその需要は急速に増加している。半導体素子の動作時の発熱による性能劣化を防ぐため、絶縁放熱基板としてセラミックスが多く利用されている。窒化ケイ素、窒化アルミニウム、アルミナが用いられており、その中でも窒化ケイ素は高い熱伝導性、絶縁性に加え強度特性を合わせ持つ。使用環境が厳しい電気自動車用途の絶縁放熱基板として多く採用されている。

1. 製品適用分野

パワー半導体モジュール^{注1)}やインバーター、コンバーター^{注2)}等の絶縁放熱基板など。

2. 適用分野の背景

深刻化する地球温暖化に対応すべく、世界的にカーボンニュートラルに向けた取り組みが加速している。電気自動車（EV）へのシフト、再生可能エネルギーの利用拡大、省エネルギーの推進等を背景にエネルギーロスを削減できるパワー半導体の需要は急速に増加している。パワー半導体はシステム全体の軽量、省スペース化および高効率化により小型化、高出力化が求められており、動作時の発熱量は増加する傾向にある。熱によるデバイスの性能劣化、信頼性の低下を防ぐため、その設計を行ううえで低熱抵抗化、高耐熱化および熱応力に対する長期信頼性を確保することが必要となる。放熱対策として半導体素子とヒートシンクの間に絶縁放熱基板を挟み、絶縁を保ちつつ素子で発生する熱を効率良くヒートシンク側に放熱している。この絶縁放熱基板に窒化ケイ素をはじめとするセラミックスが用いられている。

3. セラミックスの特徴

窒化ケイ素はシリコン（Si）と窒素（N）からなる共有結合性の物質で、物理的にも化学的にも安定

であり、軽量で高い強度特性や耐摩耗性、絶縁性、耐熱性、耐食性などを兼ね備えている。一方で共有結合性が強く焼結性が悪いため、酸化物系の焼結助剤を添加し液相焼結で緻密化させている。その微構造は柱状構造を持つ窒化ケイ素結晶相と助剤成分からなる粒界相が3次的に複雑に絡まった組織となっている。

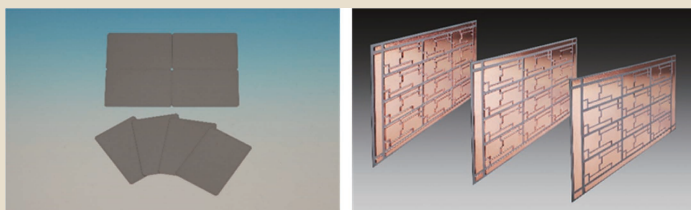
窒化ケイ素の諸特性はその微構造に大きく依存する。微構造は焼結助剤種や焼結条件により大きく変わるため、要求特性に応じて組成・プロセスの最適化を行う必要がある。窒化ケイ素の柱状結晶はその長手方向に高い熱伝導率を有するため、長手方向に結晶成長させると熱伝導率は向上するが、結晶粒子の粗大化はトレードオフとして強度低下をもたらす。

4. 製品

図1に窒化ケイ素基板単体と銅回路基板の外観を示す。高熱伝導性、高絶縁耐性を有することからパワー半導体モジュールやインバーター、コンバーター等の絶縁放熱基板に使用されている。また機械的特性にも優れることから、特にEVの駆動用モータを制御するパワーコントロールユニット（Power Control Unit: PCU）に多く採用されている¹⁾。モジュール内には窒化ケイ素基板の表裏両面に銅板が接合されることが多い。モジュールの熱抵抗を低減するためには窒化ケイ素の熱伝導率を上げるか基板厚を薄くする手段がある。また接合している銅基板厚を厚くすることも有効である。

5. 製法

窒化ケイ素基板の製造工程を図2に示す。原料、調合、シート成形、脱脂、焼結工程を経て製造される。原料には窒化ケイ素粉末を用い、酸化物系焼結助剤、バインダーおよび溶媒等を調合工程にてボールミルやビーズミルを用いて解砕・混合し、スラリーを作製する。ドクターブレード法等を用いてス



基板単体

銅回路基板

図1 窒化ケイ素基板 左：基板単体、右：銅回路基板

銅回路基板は窒化ケイ素基板の表裏両面に銅板が接合されている。半導体モジュール内には銅回路基板として組み込まれることが多い。



図2 窒化ケイ素基板の製造工程

窒化ケイ素粉末、酸化物系焼結助剤、バインダーおよび溶媒を調合し、スラリーを作製する。スラリーをシート状に成型し脱脂で有機成分を除去後、焼結し緻密化させる。

表1 各種セラミックス材料の主要特性

特性\材種名	窒化ケイ素 (Si ₃ N ₄)	窒化アルミニウム (AlN)	アルミナ (Al ₂ O ₃)	ジルコニア強化アルミナ (ZTA)
熱伝導率 (W/m・K)	60 ~ 130	70 ~ 230	20 ~ 30	17 ~ 30
曲げ強度 (MPa)	650 ~ 850	330 ~ 450	310 ~ 400	550 ~ 800
破壊靱性 (MPa・m ^{1/2})	5 ~ 7	2 ~ 4	3 ~ 4	5 ~ 6
線膨張係数 (× 10 ⁻⁶ /K)	2.6 ~ 3.4	4.5 ~ 4.6	7.1 ~ 8.1	7 ~ 8
絶縁耐力 (kV/mm)	> 14	> 14	> 12	> 10
比誘電率	7 ~ 9	8 ~ 9	9 ~ 10	10 ~ 12

ラリーを薄いシート状に成形し乾燥後、次の脱脂工程で加熱処理を行いシート内の有機成分を熱分解させ除去する。その後、焼結工程で1700℃以上の温度で焼成し緻密化させる。

6. 製品性能・スペック

現在パワーモジュール用途に実用化されている窒化ケイ素の主要特性を、従来の材料であるアルミナなどの酸化物セラミックスおよび窒化アルミニウムと比較して表1に示す²⁾。

窒化ケイ素の熱伝導率は窒化アルミニウムの最高値の1/2 ~ 1/3レベルにとどまるもののアルミナの3 ~ 4倍になる。また曲げ強度・破壊靱性において、窒化ケイ素はアルミナ・窒化アルミニウムの約2倍であることが際立った特長である。なお絶縁耐力・比誘電率は窒化ケイ素、窒化アルミニウムおよびアルミナ間ではほぼ同等である。

半導体素子の高出力化により電流密度と発熱密度が増大したり小型化が進展したりすると、前述の通りパワーモジュールにおけるセラミックス基板の熱抵抗を低減する必要がある。そのため薄板化したアルミナ基板や窒化アルミニウム基板が適用されてきた。その後、パワーモジュールの熱疲労特性（熱サイクルによる耐クラック性）の向上を主とする高信頼化要求が高まったことから、低熱抵抗化と両立させるために1990年代半ばより強度信頼性の高い窒化ケイ素基板の適用が始まった経緯がある。

7. 現在・将来展望

今後、パワー半導体分野におけるさらなる高出力

化、高集積化、薄型化、軽量化のニーズが高まる中、窒化ケイ素材料の高熱伝導化、高耐圧化、高強度化等の機能改善はこれからも重要な課題となる。またEV市場の競争激化から低コスト化も非常に重要である。

さらにカーボンニュートラル達成に向け、パワー半導体はより高耐圧、低損失が要求されてきており、従来のSi素子に変わりSiC素子やGaN素子等の次世代パワー半導体が注目されている。これらは高温域でも使用可能であることから、パワーモジュールに適用される絶縁基板の使用温度条件は最高で400℃程度の高温側へシフトすることも今後可能性としてありうる。加えて次世代半導体素子はSi素子より一層小さいサイズとなって発熱密度が高くなる傾向になることから、パワーモジュールの熱抵抗をさらに低減する必要性が生じ、銅回路厚化がさらに進展することも考えられる。

これらのことから熱サイクル試験条件要求がより厳しくなることが想定され、次世代半導体素子実装用基板として、優れた耐クラック性・耐熱性と放熱性を合わせもつ窒化ケイ素基板に対する期待は今後一層高まるものとみられる。

文 献

- 1) 那波隆之，實機直十，谷川浩司，東芝レビュー，78，41-45（2023）。
- 2) 那波隆之，“次世代パワーデバイスに向けた高耐熱・高放熱材料の開発と熱対策～基板・接合・封止・冷却技術～”，技術情報協会（2024）pp. 73-84。

〔連絡先〕 兵藤 浩之（ひょうどう ひろゆき）
東芝マテリアル株式会社 開発・技術部
〒235-8522 横浜市磯子区新杉田8