

厚銅貼り窒化珪素回路基板の開発

A Thick Cu Plate Bonded Silicon Nitride Circuit Substrate

菊池広実* *Hiroki Kikuchi*
今村寿之* *Hisayuki Imamura*
加賀洋一郎* *Youichirou Kaga*
手島博幸* *Hiroyuki Teshima*
渡辺純一* *Junichi Watanabe*

パワーモジュールの高密度実装化に伴い、その高放熱化が課題となっている。このパワーモジュール用回路基板への適用を目的に厚銅貼り窒化珪素回路基板の試作・評価を行った。90 W/m²・K窒化珪素基板に1.0 mmの厚銅を貼った回路基板では0.3 mm厚銅回路基板対比で11 %の熱抵抗低減を確認した。また、窒化珪素材のさらなる高熱伝導化を検討し、120 W/m²・Kの窒化珪素材を開発した。

Along with downsizing and increasing the power of semiconductor modules, higher thermal dissipation has also become a serious issue. In order to make circuit substrates for such power modules, thick Cu plate bonded silicon nitride substrates were manufactured and evaluated. By using 90 W/m²・K silicon nitride bonded with 1.0 mm thick Cu plate, the thermal resistance of a sample power module was 11 % less than that of substrate bonded with 0.3 mm thick Cu plate.

Furthermore, silicon nitride material with a thermal conductivity of 120 W/m²・K was developed.

① 緒 言

省エネ意識の高まりにより、インバーター制御機器に搭載されるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) , MOS-FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) などのパワー半導体は、従来の家電品・産業機器などに加え、ハイブリッド車・風力発電などの新分野でその市場の拡大が見込まれている。このパワー半導体を搭載したパワーモジュール用回路基板には放熱性と絶縁性が要求され、放熱性に優れたセラミックス基板が使われる。とりわけハイブリッド車のモーター制御用パワーモジュールには高いパワー密度と信頼性が必要であり、回路基板として熱伝導率の高いAlN (窒化アルミニウム) 基板が使用されている。そのモジュール構造は、AlN基板にAl (アルミニウム) 配線を接合した回路基板の上面にIGBT, MOS-FETなどのパワー半導体をはんだ付けされ、下面にはCu-Mo, AlSiCなどの低熱膨張材からなる放熱板をはんだ付けで、さらにこの放熱板下部に水冷冷却フィンが取り付けられたものである。この構造は、熱サイクルで問題となるパワー半導体下のはんだ層クラックやAlN内のクラックを抑制する信頼性に優れた構造である¹⁾が、銅に比べて熱伝導性に劣るAl配線が使われているため、パワーモジュールとしての放熱性は必ずしも十分でない。パワーデバイスのパワー密度は年々高く

なっており、その高放熱化が重要課題となっている。

この高放熱化に対応したパワーモジュール構造のひとつとして、厚い銅をセラミックス基板に貼り付けた構造が注目されている²⁾。通常、パワーモジュール用回路基板の銅厚は0.3 mm内外であるが、放熱性向上の観点から1.0 mm厚を超える銅を接合する市場要求もある。

窒化珪素 (Si₃N₄) は、機械強度や靱性が高く、従来より耐熱部材、ベアリングなどの構造部材として用いられてきた。近年、窒化珪素の熱伝導率を高めようとする研究が盛んになり、窒化珪素セラミックス中のSi₃N₄結晶をC軸に平行となるように配向させるため、高温高圧のホットプレスにより焼結したものでは、配向方向のみではあるが熱伝導率が150 W/m²・Kの材料が報告されている³⁾。また日立金属も、出発組成と焼結助剤の検討および焼結条件の最適化により、実用的な製造プロセスで熱伝導率が80 W/m²・Kの窒化珪素基板を開発していた⁴⁾。

本報は、高強度、高熱伝導の窒化珪素材の特長を生かして、窒化珪素基板に厚銅を接合した回路基板を製作し、その放熱特性、信頼性の改善に関して報告する。また、窒化珪素材のさらなる高熱伝導化について検討し、熱伝導率が120 W/m²・Kの窒化珪素材を開発したので、その放熱特性の評価結果を報告する。

*日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所

*Advanced Electronics Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

② 厚銅貼り回路基板

2.1 窒化珪素基板の特性

開発材の特性を表1にまとめる。なお比較例として、パワーモジュール用回路基板に用いられている他のセラミックス材料の特性も併記する。本開発材は、従来材⁴⁾をベースに、基板のように薄型の形状で焼結しても、窒化珪素特有の高強度、高靱性などの特性を損なうことなく高熱伝導性を実現した材料であり、0.2 mm厚の薄い基板であっても曲げ強度750 MPa、熱伝導率90 W/m・Kの特性を得ることができる。

表1 開発した高熱伝導窒化珪素材と他のセラミックス材料の特性

Table 1 Properties of developed high thermal conductivity silicon nitride material and other ceramic materials

基板の特性	単位	Si ₃ N ₄ 開発材	AlN	Al ₂ O ₃
熱伝導率	W/m・K	90	120 ~ 170	17
曲げ強度	MPa	750	350 ~ 500	250
破壊靱性	MPa・m ^{1/2}	6.4	2 ~ 3	3.5
熱膨張係数	10 ⁻⁶ /K	2.5	4.4	7.2
体積抵抗率	・m	> 10 ¹³	> 10 ¹¹	> 10 ¹²
誘電率(1 MHz)	-	7 ~ 8	9	10
絶縁耐圧	kV/mm	18	17 ~ 37	13

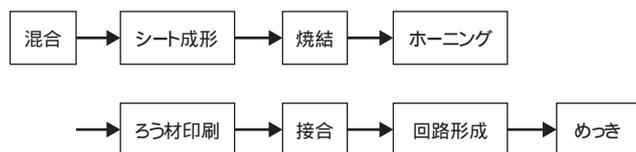


図1 窒化珪素基板製造プロセス

Fig. 1 Manufacturing process of silicon nitride substrates.

図1に本窒化珪素回路基板の製造プロセスを示す。窒化珪素基板はシート成形したものを窒素雰囲気中で焼結して白基板を得る。出発組成、焼結条件の見直しにより、厚さ0.2 mmの高強度、高熱伝導窒化珪素白基板を得た。作製した基板寸法100 mm角の白基板を図2に示す。次に白基板と銅板とを活性金属法により真空中で接合し、エッチングで回路を形成し、めっきを施して銅貼り回路基板を得た。試作例を図3に示す。この厚銅貼り窒化珪素基板は、厚さ0.32 mmの窒化珪素白基板に、厚さ1.5 mmの銅板を接合したものである。図1の製造プロセスにより、窒化珪素白基板に厚みの異なる銅板を接合して銅貼り回路基板を試作し、その放熱性能と信頼性評価を行った。

2.2 熱抵抗評価

接合する銅板厚の放熱性に及ぼす影響を調べるために、パワーモジュールを試作しその評価を行った。銅貼り回路基板の放熱特性であるCu配線厚と熱抵抗の関係を図4に示す。評価した回路モジュールの構造は、熱伝導率90 W/m・Kを持つ寸法50 × 30 × 0.32 mmの窒化珪素基板に、厚さ0.3, 0.6, 1.0 mmのCu配線を接合した窒化珪素回路基板の回路面に半導体チップを搭載し、放熱面には85 ×



図2 厚さ0.2 mmの窒化珪素白基板

Fig. 2 Silicon nitride substrate with thickness of 0.2 mm.

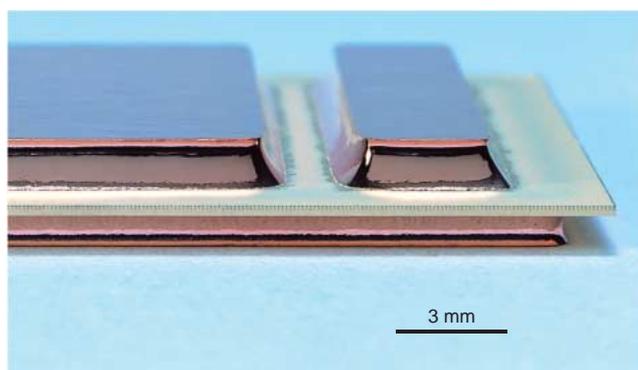


図3 厚銅貼り窒化珪素基板

Fig. 3 Thick Cu plate bonded silicon nitride substrate.

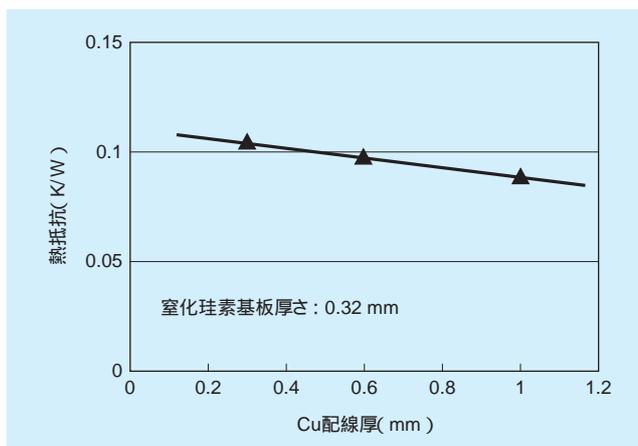


図4 Cu配線厚と熱抵抗の関係

Fig. 4 Relationship between thermal resistance and Cu circuit thickness.

40 × 3 mmの銅製の放熱板をはんだ付けし、半導体チップにはAlのワイヤボンディングによりリードを取り付け評価用モジュールとした。熱抵抗は、通電した時の半導体チップへの投入電力と温度上昇から求めた。Cu配線厚が増加すると熱抵抗は減少し、Cu配線厚1.0 mmの回路基板を用いたモジュールでは、Cu配線厚0.3 mmの回路

基板を用いたモジュールに対して11%熱抵抗が低下した。すなわち厚銅貼り窒化珪素回路基板を用いたパワーモジュールは、熱抵抗を低減させ、高放熱化に有効であることがわかった。

2.3 信頼性評価

厚銅貼り窒化珪素基板は、その接合部で材料の熱膨張差によって信頼性が劣化しないかと懸念された。そこで窒化珪素基板単体での熱サイクル試験を行い、熱サイクル試験後に絶縁基板としての重要な特性である絶縁破壊電圧を測定した。結果を図5に示す。試験には、寸法 $35 \times 30 \times 0.32$ mmの窒化珪素基板に厚さが0.4 mmから最大2.5 mmまでの銅配線を接合した厚銅貼り窒化珪素回路基板を用いた。熱サイクル試験条件は、 -55 15分、 150 15分を3,000サイクルとした。また、耐圧試験器により交流電圧を印加し、室温の絶縁油中で絶縁耐圧試験を行った。図5によれば、熱サイクル試験をしていない窒化珪素白基板の絶縁破壊電圧は、熱サイクル試験前に $9 \sim 10$ kVであったものが試験後は $8.5 \sim 10$ kVであり、窒化珪素白基板の絶縁破壊電圧と同レベルである。すなわち本開発窒化珪素回路基板は、2.5 mmの厚銅を貼った場合でも3,000サイクルの熱サイクル試験後で絶縁破壊電圧の低下がみられず、銅を貼っていない窒化珪素白基板と同等の絶縁性を有していることがわかった。

以上の結果から、パワーモジュール用回路基板の最重要評価項目のひとつである絶縁破壊電圧に関して、本開発回路基板は高い信頼性を有していることが確認できた。

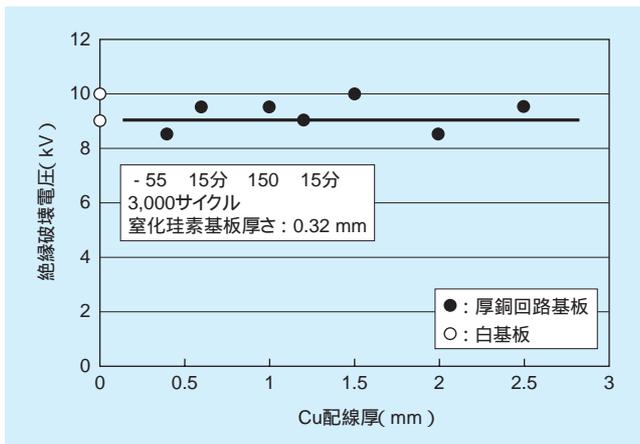


図5 Cu配線厚さと絶縁破壊電圧の関係

Fig. 5 Relationship between breakdown voltage and Cu circuit thickness.

③ 100 W/m·K超窒化珪素基板の開発

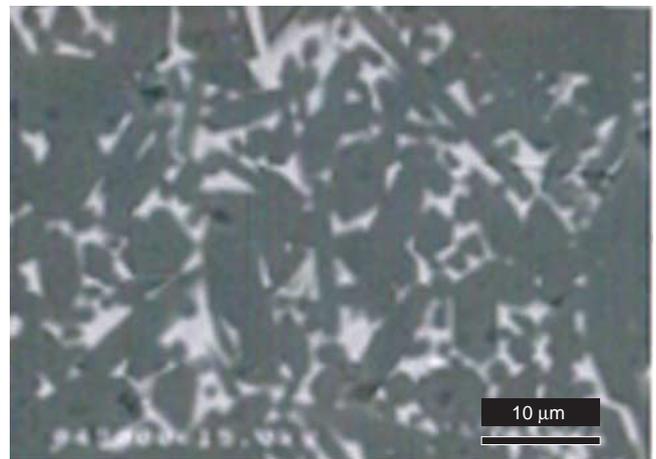
3.1 窒化珪素材の高熱伝導化

Cu配線を厚くした厚銅貼り窒化珪素は、パワーモジュールの高放熱化の有効な手法であるが、もうひとつのアプローチとして、窒化珪素のさらなる高熱伝導化がある。材料特性改善の方法としては、窒化珪素結晶のミクロ組織制御とその高純度化、ならびに粒界相量制御の3点に着目した。高熱伝導と高強度とを両立させる窒化珪素のミ

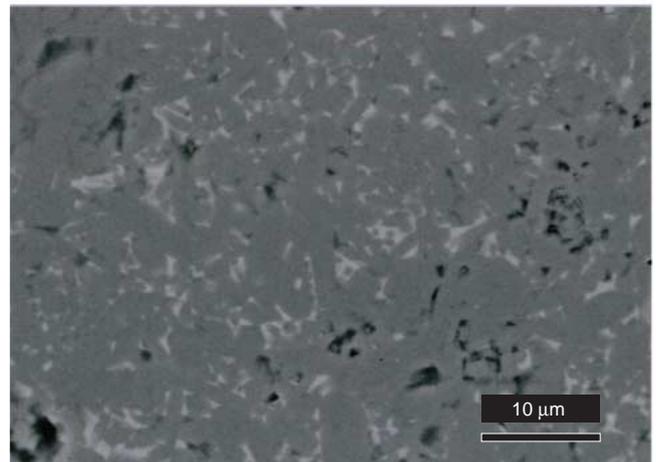
クロ組織として、熱伝導率の高いC軸方向に結晶成長させた柱状結晶と、強度を維持する微細結晶とからなる複合組織の実現を試みた。さらにその高純度化により、高熱伝導化を図った。また粒界相に関しては、その総量が不足すると薄い基板形状とした際に強度が低下することから、形成量の最適化を行った。

図6(a)に得られた開発材のミクロ組織を示す。比較として 90 W/m·K、 750 MPa材のミクロ組織を図6(b)に示す。開発材はC軸方向に成長し、長さが $10 \sim 20$ μmの柱状結晶と、大きさが $3 \sim 8$ μmの粒状結晶からなり、複合組織が実現している。また、比較的潤沢な粒界相が観察される。一方、図6(b)に示す熱伝導率が 90 W/m·Kの窒化珪素基板は、大きさが 5 μm以下の比較的均一な粒状の結晶で構成されている。

本開発材では、厚さ 0.32 mmの基板形状で熱伝導率 120 W/m·Kを達成した。曲げ強度は 550 MPaで改善の余地を残すものの、銅貼り回路基板の作製は可能であり、その放熱特性を評価することとした。



(a) 120 W/m·K, 550 MPa



(b) 90 W/m·K, 750 MPa

図6 窒化珪素基板のミクロ組織

Fig. 6 Microstructure of silicon nitride substrate.

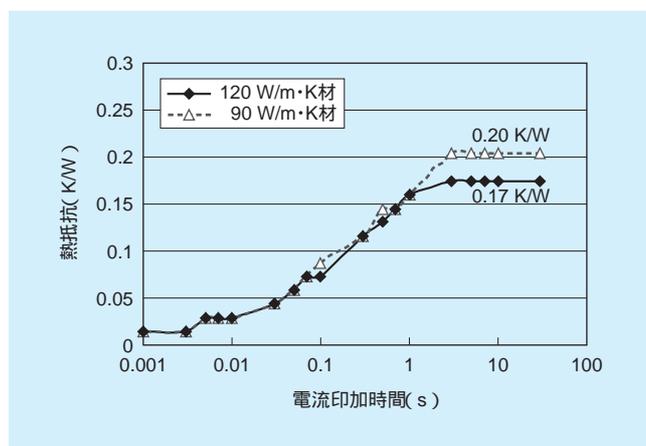


図7 電流印加時間と熱抵抗の関係

Fig. 7 Relationship between thermal resistance and current applying time.

3.2 熱抵抗評価

120 W/m·Kの窒化珪素基板で作製したパワーモジュールの過渡熱特性を図7に示す。このパワーモジュールの構成は、回路面の銅厚が0.5 mm、窒化珪素基板の厚さが0.32 mm、放熱面の銅厚が0.4 mmであり、回路面にはパワー半導体チップが接合されている。また、回路基板下部の放熱板を省略し、簡素化した構造にしている。図には、本パワーモジュールで、パワー半導体チップに電流を印加した時の熱抵抗の変化を示す。比較試料は熱伝導率が90 W/m·Kの窒化珪素基板である。120 W/m·Kおよび90 W/m·Kの窒化珪素基板はいずれも電流印加時間3秒後には熱抵抗が飽和し、その時の熱抵抗はそれぞれ0.17 K/Wと0.20 K/Wである。すなわち、120 W/m·Kの窒化珪素基板では熱抵抗が15%低減した。

熱伝導率120 W/m·Kの窒化珪素基板を用いることで厚銅貼り回路モジュールの放熱性改善を確認した。

4 結 言

窒化珪素基板の特長である高強度、高熱伝導性を生かした基板に厚銅を貼り付けたパワーモジュール用回路基板を開発した。本開発にあたり窒化珪素材の改良および厚銅を貼り付けた回路基板のプロセス検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 厚さ1.0 mmの厚銅を貼った窒化珪素回路基板搭載のパワーモジュールは、厚さ0.3 mm回路基板対比で熱抵抗が11%低減することを確認し、回路基板の厚銅化が熱抵抗低減に有効である。
- (2) 厚銅貼り窒化珪素基板は、3,000サイクルの熱サイクル試験後の絶縁破壊電圧が8.5~10 kV(実効値)あり熱サイクルによる低下が少ない。
- (3) 120 W/m·Kの窒化珪素基板を開発し、同基板の放熱性を評価したところ、90 W/m·Kの現行窒化珪素基板対比で熱抵抗が15%低減することを確認した。

参考文献

- 1) 長友ら : エレクトロニクス実装学会誌 3(2000). No. 4. 330.
- 2) H. Imamura, et al. : IMAP 31st Annual Symposium Proc. (2004), p14
- 3) N. Hirotsuki, et al. : J.Ceram. Soc. Jpn., 104(1996), 49.
- 4) 祖父江ら : 日立金属技報17(2001), 77.



菊池広実

Hiromi Kikuchi
日立金属株式会社
先端エレクトロニクス研究所



今村寿之

Hisayuki Imamura
日立金属株式会社
先端エレクトロニクス研究所



加賀洋一郎

Youichirou Kaga
日立金属株式会社
先端エレクトロニクス研究所



手島博幸

Hiroyuki Teshima
日立金属株式会社
先端エレクトロニクス研究所



渡辺純一

Junichi Watanabe
日立金属株式会社
先端エレクトロニクス研究所