

炭素系異方伝熱材料のパワー半導体モジュールへの適用可能性

Study for Power Semiconductor Module Using Carbon-Based Anisotropic Thermal Conducting Material

山田靖*** 久野敦輝** 澤木聖斗* 成田恭典* 竹馬克洋***

Y. Yamada*** A. Kuno** M. Sawaki* Y. Narita* K. Chikuba***

Summary

Study for a package using novel heatsink has been carried out by thermal and structural simulations. The heatsink is consisted of double structure of carbon-based anisotropic material. After the calculation of thermal resistances and thermal stresses, lower thermal resistance of a package using the heatsink is found than that of Cu heatsink. In addition, it is expected that thermal stress of thermal cycle is reduced using rectangular semiconductor chips.

キーワード：パワー半導体モジュール、放熱板、異方性、伝熱、炭素

Keywords：Power semiconductor module, Heatsink, Anisotropic, Heat conduction, Carbon

1. はじめに

地球環境問題への対応として、電気自動車や小規模発電等における小型電力変換器の需要が拡大している。その変換器にはパワー半導体が多数用いられている。現在のパワー半導体はSiを材料としたものが主流であるが、より高性能なSiCやGaNパワー半導体を用いた、高パワー密度モジュールの開発が行われている^(1,2)。その際、パワー半導体における熱問題がより顕著になると考えられる。パワー半導体は、電力損失に伴う熱流束が大きく、放熱板を用いて熱拡散させることが多い。その放熱板にはCuやAlなどの金属や、熱膨張係数差を考慮したAlSiCなどが用いられるが、最も熱伝導率が高いものでもCuの400W/mK程度であり、さらに熱伝導率の高い材料が求められている。

炭素系材料⁽³⁾の中で、グラファイト材料は特定の

方向(X, Y方向)に極めて高い熱伝導率を示し、最大では1,700W/mK程度である⁽⁴⁾。しかし薄板状のものは、面に直交する方向(Z方向)の熱伝導率が低く、メリットが得られにくい。本研究では、図1に示すように、面方向に高熱伝導を持つグラファイト材料を90°回転させ、横方向に積層した板を作製し、Z方向とXもしくはY方向に高い熱伝導を持たせた。この板を、図2に示すように、上下に二枚貼り合わせた。従って上部はX, Z方向が高熱伝導となり、下部はY, Z方向が高熱伝導となることにより、Z方向の高い熱伝導に加えて面内方向(X, Y方向)への放熱が期待でき、従来のCuを用いた放熱板より低い熱抵抗となる可能性が考えられる。

本論文では、そのようにグラファイトによるX, Z方向に高熱伝導を示す板と、Y, Z方向に高熱伝導を示す板を貼り合わせた構造の、放熱板としての適用可能性を3次元有限要素法による熱解析および熱応力解析を用いて検討した。

* 大同大学工学部電気電子工学科

** 大同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻

*** 株式会社サーモグラフィティクス

2. グラファイト材料

本研究で検討したグラファイトの物性値を表 1 に、他材料との比較を表 2 に示す。本グラファイトは、一般的なグラファイトと同様の構造を持ち、六員環が共有結合で繋がったグラフェンが積層した構造体である。各面はファンデルワールス力で結合されている。製造方法は、図 3 に示す CVD 法 (Chemical Vapor Deposition) を用いて、原料となる炭化水素ガスを加熱反応炉へ流し、2,000°C 以上の加熱により、基板に結晶を積層させている。板状として生成されたグラファイトは、以下の特徴を持つ。

1. 熱伝導率が 2 方向に 1,700W/mK と高く、従来の金属系材料に比べ、約 4~8 倍。
2. 熱膨張係数が、熱伝導率の高い方向では -0.6ppm/K と小さく、半導体材料との整合が期待される。
3. 密度が 2.22g/cm³ であり、従来の金属系材料に比べ、半分以下の重量により、モジュールの軽量化が見込まれる。
4. 従来のカーボン材料と異なり、金属などの表面コーティングが可能で接合できる。
5. 高精度な成形、加工が可能。

表 1 グラファイトの物性値

特性	方向	値
密度[g/cm ³]	-	2.22
引張強度[kPa]	a	28,900
弾性率[GPa]	a	50
曲げ弾性率[MPa]	a	33,200
熱膨張係数[ppm/K]	a	-0.6
	c	25
熱伝導率[W/mK]	a	1,700
	c	7
電気抵抗率[Ω·cm]	a	5.0 × 10 ⁻⁴
	c	0.6
酸化開始温度[°C]	a	650
透過性[He]	-	10 ⁻⁶ mmHg

表 2 他各種材料との特性比較

	熱伝導率 [W/mK]	熱膨張係数 [ppm/K]	加工性	密度 [g/cm ³]
グラファイト	1,700	-0.6	○	2.22
ダイヤモンド	2,000	2.3	△	3.52
Al ₂ O ₃	20	8	○	3.9
SiC	60~490	4.2	△	3.25
AlN	70~260	4.7	△	3.3
BeO	250	7.8	△	2.9
Si	150	2.6	○	2.33
Ag	430	19.1	○	10.5
Cu	400	16.8	○	8.92

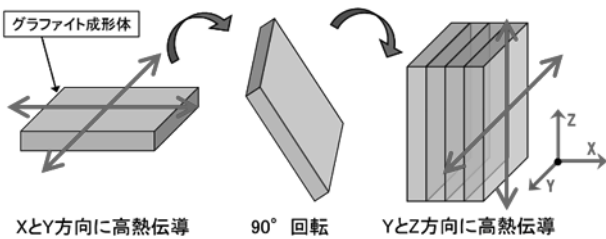


図 1 熱伝導方向制御の模式図

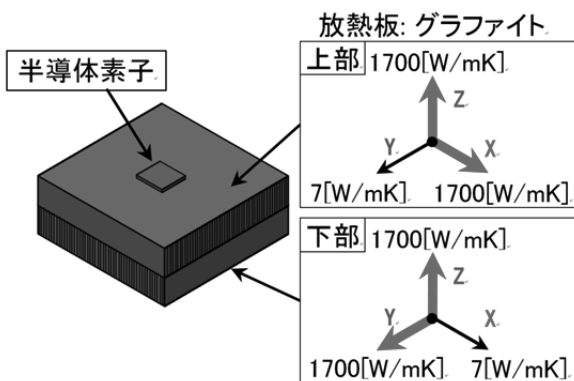


図 2 本構造におけるグラファイトの熱伝導率

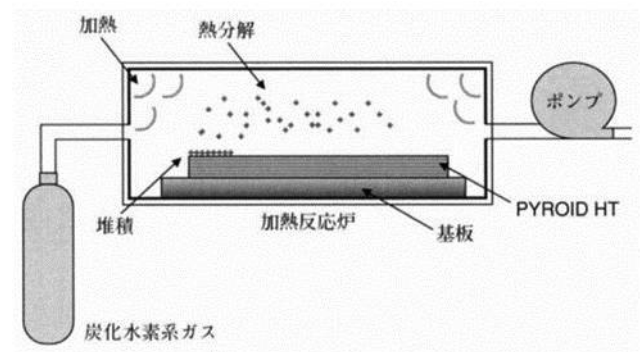


図 3 グラファイトの製造方法

3. 熱特性予測

3.1 解析方法

放熱板にグラファイトを適用した本構造について、定常熱解析を行い、構造全体の熱抵抗を求めた。比較として放熱板にCuやCuMoを用いた構造について解析を行った。

解析に用いたモデルの外観を図4に、断面構造を図5に示す。また、その物性値および寸法を表3に示す。解析モデルは、簡易な構造として、半導体素子を放熱板の中心に実装し、それを伝熱グリスで冷却器に固定した構造とした。半導体素子は、今後適用が見込まれるSiC素子として、その素子上面に一様な熱流束を設定した。素子とグラファイトの接合部は、Sn-3Ag-0.5Cuはんだとした。グラファイトの厚さは3mmの2層(計6mm)とした。冷却器は底面一様に、温度65°Cおよび、熱伝達係数を設定した。熱伝達係数は、水冷や空冷などの状況を想定し、10~100,000W/m²Kとした。構造全体の熱抵抗 R_{th} [K/W]を、以下の計算式(1)により求めた。

$$R_{th} = (T_1 - T_2) / P \quad (1)$$

T_1 [°C]はSiC素子の上面の中心温度とし、 T_2 [°C]は冷却器の冷媒温度(65°C)、 P [W]はSiC素子に与えた熱量である。

3.2 解析結果および考察

図6に解析から求めた、構造全体の熱抵抗を示す。この結果から、放熱板にグラファイトを用いた場合では、CuやCuMoの場合と比較して、いずれの熱伝達係数でも熱抵抗が低い結果が得られた。これは、本グラファイトは厚さ方向(Z方向)に高い熱伝導率を示すことが要因として挙げられる。また、本グラファイトは短所として1方向に低い熱伝導率を示すが、本構造では、異なる方向に高い熱伝導を示す2枚の板(X,Z方向とY,Z方向)を貼り合わせたことで、Z方向以外の2方向(X,Y方向)にも高い熱伝導が得られ、効果的に熱抵抗が減少したと考えられる。従って、本構造は、熱抵抗がCuを用いた場合よりも低く、放熱板にグラファイトを適用することで、従来のパワーモジュールより、放熱性の高い構造が実現できる可能性が予想された。

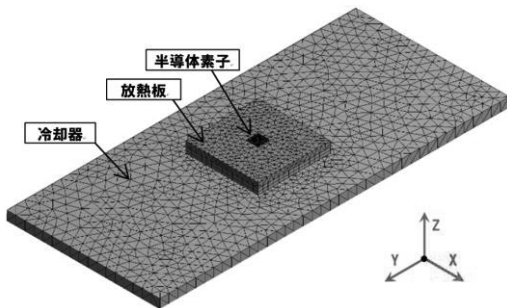


図4 熱解析に用いたモデルの外観

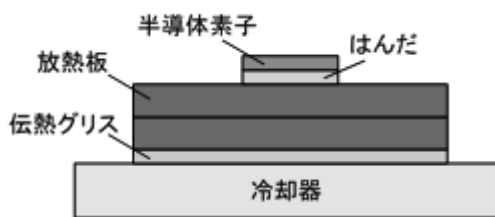


図5. 熱解析に用いたモデルの断面構造

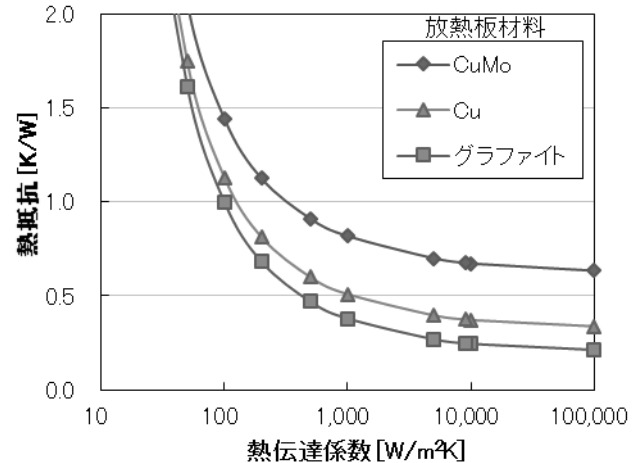


図6. 構造全体の熱抵抗

表3 解析に用いた材料物性値および寸法

構成要素	材料	熱伝導率 [W/mK]	熱膨張係数 [ppm/K]	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	サイズ [mm]
半導体素子	SiC	450	3	440	0.3	6×6×0.5(熱解析) 6×6×0.1(構造解析)
	はんだ	Sn-3Ag-0.5Cu	70	22	38	0.38
放熱板	グラファイト(上)	X:1700,Y:7,Z:1700	X:-0.6,Y:25,Z:-0.6	50	0.3	40×40×6
	グラファイト(下)	X:7,Y:1700,Z:1700	X:25,Y:-0.6,Z:-0.6			
	Cu	400	17			
	CuMo	150				40×40×6
伝熱グリス	Silicone	1	-	-	-	40×40×0.06
冷却器	Al	140				85×194×5

4. 構造解析による信頼性予測

4.1 解析方法

本グラファイトは、結晶配列の向きにより熱膨張係数が異なっており、a 軸に -0.6ppm/K 、c 軸に 25ppm/K である。この異方的性質を持つ、グラファイトを放熱板に適用したときの信頼性について、構造解析を用いて検討した。今回、信頼性試験の一つである温度サイクル試験を想定し、環境温度の変化により材料間の熱膨張係数差に起因して発生する応力を、相当応力で評価した。なお、本研究では簡易的な予測のため、線形解析とした。

構造解析に使用したモデルを図 7 に示す。モデルの構成は、SiC 素子、はんだ、放熱板として、その物性値および寸法を表 3 に示す。解析条件として、モデル全体の周囲温度を 25°C から 200°C へ上昇させた。拘束条件として、放熱板の裏面中央を固定した。

4.2 解析結果および考察

図 8 に構造解析により求めた最大応力を示す。また、本構造における素子サイズと応力についても示す。いずれのモデルでも相当応力の最大値は素子付近に現れた。図 8 の結果から、熱解析と同様に素子サイズが $6\text{mm}\times 6\text{mm}$ で放熱板にグラファイトを用いた本構造(図 7a)の最大相当応力は 1.66GPa であった。これは Cu を用いた構造の 1.21GPa よりも高い値であることから、信頼性が良好でないことが推測された。

次に、応力を方向ごとに求めた。X 方向と Y 方向の最大垂直応力を求めた結果、Y 方向の最大垂直応力は 1.67GPa (引張)であり、X 方向の 0.75GPa (圧縮)と比較して高い値であった。これは、放熱板上部のグラファイトが大きな熱膨張係数を示す方向へ伸びようとするのに対して、素子の熱膨張係数が比較的小さいことにより伸びないため、Y 方向の最大垂直応力は高くなったと考えられる。

素子へ加わる最大相当応力を下げるためには、Y 方向の垂直応力を低減させる必要がある。そこで、図 7b に示すように素子面積は等しいまま、素子サイズを $12\text{mm}\times 3\text{mm}$ として、上部のグラファイトの熱膨張係数が大きな方向(Y 方向)を短辺方向としたモデルを作成し、同様に解析を行った。その結果、Y 方向の最大垂直応力が 1.31GPa (引張)まで低減され、それに伴い最大相当応力においても 1.22GPa まで低減された。これは、Cu を用いた場合と同等な応力値であり、本構造の信頼性は Cu

の放熱板と同等にできる可能性が示唆された。

なお、上記のモデルとは逆に、素子サイズを $3\text{mm}\times 12\text{mm}$ として、上部のグラファイトの熱膨張係数が大きな方向(Y 方向)を長辺方向とした結果、Y 方向の最大垂直応力が高くなることで、素子に加わる最大相当応力が 2.02GPa となり、他の素子サイズと比較して最も大きな応力値を示した。これらによって、本構造を用いた場合、長方形の素子を使用し、上部のグラファイトの熱膨張係数が大きな方向を短辺方向をとることが応力の緩和に繋がることが予測された。

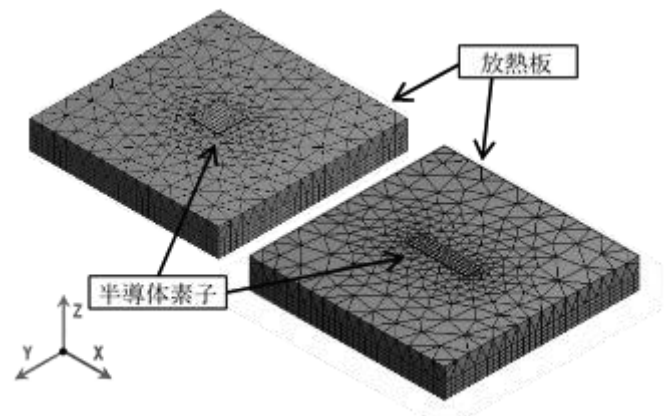


図 7 構造解析に用いたモデルの外観
(a : チップ $6\text{mm}\times 6\text{mm}$ 、b : チップ $12\text{mm}\times 3\text{mm}$)

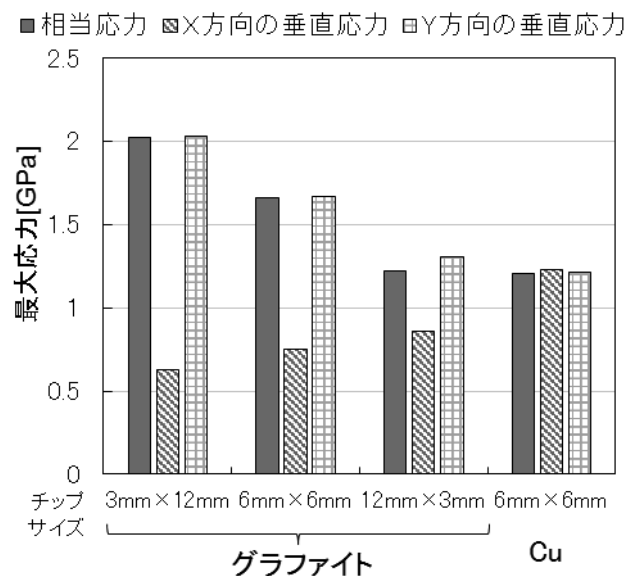


図 8 各モデルにおける最大応力および、素子サイズと応力の関係

5. まとめ

本研究では、グラファイト 2 層構造の放熱板への適用可能性を検討する目的で、簡易な解析モデルによる熱抵抗と半導体素子の熱応力予測を行った。熱解析の結果から、本構造は放熱板に Cu を用いた構造と比べ熱抵抗を低減でき、放熱板下面の熱伝達係数を変えてもその傾向は変わらないことが予測された。

また、本構造の信頼性評価として熱応力解析を行った結果、正方形の素子では Cu を用いた構造と比べ、素子にかかる応力は高い値を示した。しかし、長方形の素子を用いて、放熱板上部のグラファイトの熱膨張係数が大きな方向を短辺方向とすることで、応力を Cu と同等まで低減できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 西岡圭:”SiC パワーデバイスの車載実用化の展望”,平成 26 年電気学会全国大会講演論文集,4-S19-4,pp.13-16,2014.
- 2) 宮代文夫:”SiC パワーデバイス実装技術および実装材料の開発動向”,第 23 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集,pp.13-16,2013.
- 3) 佐々木克彦,片桐一彰,永井明夫,伊藤洋平,高橋教雄,垣辻篤:”カーボンナノチューブ-カーボンファイバーネットワークを利用したアルミニウム基高熱伝導複合材料”,第 23 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集,pp.17-20,2013.
- 4) 竹馬克洋:”高熱伝導性カーボン「PYROID HT」”,月刊コンパテック,加工技術研究会,通巻 427 号,2008.