The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	パワーモジュールの異材接合部におけるインサート材を用いた接合性向上と熱応力緩和
Author(s)	山田, 由香
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/89618
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　山　田　由　香　）	
論文題名	パワーモジュールの異材接合部におけるインサート材を用いた接合性向上と熱応力緩和

論文内容の要旨

第1章では、課題として、電動車用パワーモジュールの高温動作化に向けた熱応力によるデバイス損傷の抑制を掲げた。パワー半導体素子直下のはんだ接合部を含む上部が樹脂モールドされ、絶縁板と冷却器が放熱材を介して接合されたパワーモジュールにおける異材接合部を対象とし、インサート材による接合性の向上と熱応力緩和を目的とした。

第2章では、高信頼性樹脂モールドを実現するため、各種表面処理層をインサート材とした銅/エポキシ樹脂接合の界面強度向上について検討した。表面粗さを制御した銅基板にC-H-Si（炭素－水素－ケイ素）非晶質薄膜、Si-O（ケイ素－酸素）非晶質薄膜を成膜した試験片、Ni-P（ニッケル-リン）めっきとプライマーを施した試験片、および未処理の銅基板に対して、エポキシ樹脂を接合した結果、初期および環境試験後ともにC-H-Si非晶質薄膜をインサート材とした接合試験片が最も接合強度が高いことがわかった。第3章では、接合強度が最も高かったC-H-Si非晶質薄膜による銅/樹脂接合の初期接合強度の支配因子を明確にすることを目的とした。表面粗さおよび酸化時間を変化させた銅基板へ成膜したところ、銅基板の表面粗さが大きく、酸化時間が長いほど、C-H-Si膜の成膜粒の被覆率が高かった。銅基板のミクロ凹凸によらず、200 nm弱の成膜粒の被覆率が高いほど、C-H-Si膜と樹脂との接合強度が高く、被覆率60 %以上で35 MPa程度の高い接合強度が得られた。一方、成膜粒被覆率が15 %と低い試験片でも28 MPaの高い接合強度が得られた要因はC-H-Si膜表面の酸化官能基や有機基に起因する化学的親和性によると考察した。第4章では、パワーモジュールの高温動作化を実現するために必要不可欠な銅/C-H-Si膜/エポキシ樹脂接合体の高温動作後の信頼性向上を目指した。473 Kでの高温試験を実施したところ、高温試験後に接合強度は低下し、膜/銅基板界面ではく離した。接合強度の低下は、加熱により銅と酸素の結合力が弱くなり、膜/銅基板の界面強度が低下したためと推察した。膜/銅基板の界面に酸素との結合エネルギーが大きいFe（鉄）、Cr（クロム）を介在させたところ、高温試験後の接合強度が改善し、1000 h後も30 MPa以上の接合強度を保持することができた。樹脂/膜界面は主にC-H-Si膜のSiの酸化官能基を介して接合しており、Si-Oの強固な結合により、高温試験後も界面強度を保持したと考察した。

第5章では、セラミックス絶縁板の熱応力低減のため、セラミックス絶縁板とAl（アルミニウム）冷却器の間にインサート材として用いる高熱伝導・非接合積層構造体を創製し、その熱的効果を検証した。トポロジー最適化による熱応力緩和設計を基に、Al箔と配向性グラファイトシートを非接合状態で積層したAl/グラファイト積層ロール型複合材を創製した。グラファイトシート64 vol%の複合材単体で銅の2倍以上の高熱伝導率が得られた。本複合材を介してDBA（Al/AlN（窒化アルミニウム）/Al）基板とAlをろう付けしたモデル構造体においても、ろう付け後に良好な熱伝達を確認した。さらに、冷熱サイクル後に構造体中のAlNの残留応力を測定したところ、5000サイクルまでほぼゼロのまま推移し、熱応力緩和効果が認められた。本複合材を介したモデル構造体は純Alを介した比較構造体よりも、ろう付け後および冷熱サイクル後において変形が小さく、AlNの破壊も生じなかった。第6章では、有限要素解析により非接合型積層巻回モデルを作成し、各要素が熱応力に及ぼす影響を検証した。Al/グラファイト積層ロール型複合材の巻き数や厚みが大きくなるほど残留圧縮応力は減少することがわかった。さらにAl/グラファイト積層ロール型複合材を構成するAl箔のアスペクト比が大きくなるほど複合材の変形能が大きくなり、応力緩和効果が高くなることが導かれた。

第7章ではパワーモジュールにおける熱応力によるデバイス損傷の抑制という課題に対し、C-H-Si非晶質薄膜をインサート材とした銅/樹脂接合の界面強度向上による高信頼性樹脂モールドおよびAl/グラファイト積層ロール型複合材による熱応力緩和構造を実現し、はんだ接合部のひずみおよびセラミックス板の応力を低減する解決策を提案した。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　山田由香　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	福本信次
	副 査	教授	上西啓介
	副 査	教授	西川　宏

論文審査の結果の要旨

本論文は、高温動作可能な電動車用パワーモジュールの開発のために必要な技術課題である熱応力によるデバイス損傷の抑制に対して、デバイス内の２つの異材接合部に着目し、インサート材による接合性の向上と熱応力緩和に取り組んだ研究である。緒論においては、カーボンニュートラルな社会のための自動車の電動化に対して、電力制御に不可欠なパワーモジュールに関する諸問題を詳細に提示している。また、その中で接合部に生じる熱応力問題について十分な文献調査を元に的確に課題抽出しており、インサート材によるはんだ接合部のひずみ低減ならびにセラミックス絶縁板の熱応力低減という目的が明示されている。

ひとつめは、はんだ接合部のひずみ低減のため、各種表面処理層をインサート材とした銅/エポキシ樹脂接合の界面強度向上についての研究である。表面粗さを制御した銅基板に C-H-Si 非晶質薄膜、Si-O 非晶質薄膜を成膜した試験片、Ni-P めっきとプライマーを施した試験片、および未処理の銅基板に対して、エポキシ樹脂を接合した結果、初期および環境試験後ともに、本論文で提案されている C-H-Si 非晶質薄膜をインサート材とした接合部が最も接合強度が高いことを示している。C-H-Si 膜を介した銅基板と樹脂との接合において、銅基板の表面粗さが大きく、酸化時間が長いほど C-H-Si 膜の成膜粒の被覆率が高く、被覆率 60 %以上で 35 MPa 程度の高い接合強度が得られることを示している。一方、成膜粒被覆率が 15 %と低い試験片でも 28 MPa の高い接合強度が得られており、この要因については C-H-Si 膜表面の酸化官能基や有機基に起因する化学的親和性によると考察している。また高温試験後の接合強度は低下ならびに破断箇所の変化は、各種表面分析の結果を基に加熱による銅と酸素の結合力の低下ならびに膜/銅基板の界面強度の低下のためと考察している。さらに、Fe および Cr が酸素との結合エネルギーが大きいことに着目し、膜/銅基板の界面にそれらの元素を導入し、高温試験後の接合強度の改善を実現している。

ふたつめは、セラミックス絶縁板の熱応力低減のため、セラミックス絶縁板とアルミニウム冷却器の間の接合部に対するインサート層の構造設計に関する研究である。本インサート層は高熱伝導かつ応力緩和機構を有する必要があるため、トポロジー最適化による熱応力緩和設計を基に、Al 箔と配向性グラファイトシートを非接合状態で積層した Al/グラファイト積層ロール型複合材を提案、創製している。グラファイトシート 64 vol%の複合材単体で銅の２倍以上の高熱伝導率が得られている。本複合材を介して DBA（Al/AlN/Al）基板と Al をろう付けしたモデル構造体をおいて、ろう付け後に高い熱伝達も得られている。さらに、冷熱サイクル後に構成材料中の AlN の残留応力が低減されており、す

ぐれた熱応力緩和効果が認められている。本複合材を介したモデル構造体は純 Al を介した比較構造体よりも、ろう付け後および冷熱サイクル後において変形が小さく、AlN の破壊も生じないことを示している。有限要素解析により、Al/グラファイト積層ロール型複合材の巻き数や厚みが大きくなるほど残留圧縮応力は減少することを導いている。さらに Al/グラファイト積層ロール型複合材を構成する Al 箔のアスペクト比が大きくなるほど高い応力緩和効果が得られるメカニズムを明らかにしている。

以上のように、本論文はパワーモジュールにおける熱応力によるデバイス損傷の抑制という課題に対し、C-H-Si 非晶質薄膜をインサート材とした銅/樹脂接合の界面強度向上による高信頼性樹脂モールドおよび Al/グラファイト積層ロール型複合材を緩衝層に含む構造を実現し、はんだ接合部のひずみおよびセラミックス絶縁板の熱応力を低減する解決策を提案しており、学術的に優れており、また産業界への貢献度も高い。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。