



Title	Study on the interfacial structure between Cu and AlN using Ag-free bonding materials for high-voltage applications
Author(s)	寺崎, 伸幸
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92942
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (寺 崎 伸 幸)

論文題名

Study on the interfacial structure between Cu and AlN using Ag-free bonding materials for high-voltage applications
(高耐圧用途向け Ag-free 接合材を用いた Cu/AlN 接合界面構造に関する研究)

論文内容の要旨

本論文は、パワーモジュール用セラミックス絶縁基板として用いられるCuとAlNが活性ろう付けされたAMB (Active metal brazing) 基板のCu/AlN接合界面構造に基づいて検討された高耐圧用途向けAg-free接合材を用いたCu/AlN接合界面構造に関する研究成果であり、以下の6章より構成される。

第1章では、セラミックス絶縁基板であるDBA (Direct bonded aluminum) 基板、DBC (Direct bonded copper) 基板およびAMB 基板の製造方法およびこれらの金属/セラミックス接合界面構造について述べた。これらの基板のうち、高耐圧用途に利点のあるAMB基板のCu/AlN接合界面構造に対するAg量およびTi量の影響、およびAg-ECM (Electrochemical migration) による絶縁破壊の潜在リスクについて述べた。本リスクの本質的な対策となるAg-free接合材を用いたCu/AlN接合界面構造の知見を深めることの重要性を示した。

第2章では、AMB法によるCu/AlN接合界面形成に必要なTiN層の成長機構を明らかにするため、Ag-Cu-TiH₂、Ag-TiH₂ およびCu-TiH₂ペーストを金属層として印刷したAlN基板を850℃で熱処理し、形成されたTiN層の粒界相を中心に組織観察を行った。AlN基板へのろう付け過程および固相焼結過程によらず、AlN基板内部へと成長したTiN層はTiN粒子とAgおよびCuを主成分とする粒界相から構成されることを明らかにした。この粒界相に固溶したAl濃度はAlN基板側から金属層側に向かい減少することを示し、TiN層成長にAl-Ag (Cu) 共晶液相が寄与することを明らかにした。

第3章では、金属/TiN粒子接合界面の形成に及ぼすTiN粒子形成プロセスと金属粒界相成分の影響を明らかにするため、850℃で金属粒界相のないTiN固相焼結セラミックスおよびTiN-Fe-NiC-Mo₂C液相焼結セラミックスへCuをAg-Cuろう付けした界面構造を評価した。また、Ag-Cuろう付けによるCu/セラミックス接合界面の一般構造を明らかにするため、同一条件で作製したWC-Co超硬合金へのAg-Cuろう付け界面構造と上記界面構造を比較した。TiN固相焼結体へのろう付けは実現されず、ろう材層とTiN粒子の接合には機械的接合より化学的接合の寄与が大きいことを明らかにした。一方、TiN液相焼結体へのろう付け界面にはTiN粒子表面がFeによって改質されたFe含有偏析層からなるCu/Fe含有偏析層/TiN粒子界面構造およびAg/Cu含有偏析層/Fe含有偏析層/TiN粒子界面構造が形成されることを示した。セラミック粒子の表面改質に起因した偏析層を含む同様の界面構造がWC-Co超硬合金でも得られており、Agを必要としないCu/セラミック表面改質相/セラミック界面構造が一般的な構造であることを明らかにした。

第4章では、第3章の結果に基づき、Ag-free接合材適用時のCu/AlN接合界面構造およびFe添加がCu/AlN接合界面構造に与える影響を明らかにするため、AlN基板上にMg-Ti (-Fe) 共蒸着膜を形成したCuを800℃～950℃で接合し、Cu/AlN接合界面構造を評価した。また、Cu/AlN接合界面のピール強度を評価した。AMB基板と同様にCu/AlN接合界面にはTiN粒子とCu含有粒界相から構成されるTiN層が形成されており、TiN粒子表面はMgまたはFeによって改質されることを示した。Fe未添加の場合、ピール強度はTiN層厚さに依存せず、接合温度の上昇に伴い指数関数的に増加し、950℃において約15N/mm を達成した。TiN層/AlN界面で生じたCu/AlN接合界面破断はAlN表面に形成されたMg-O相の発達により抑制されることを明らかにした。また、Fe添加の場合、850℃以下においてピール強度は最大で約1.8倍に向上し、AlN表面にはMg-O相ではなく、Mg-Fe-O相が発達していることを明らかにした。

第5章では、Cu/AlN接合界面に対するAg-free接合材成分の影響を明らかにするため、Cu-P-Sn-Niろう箔およびTi層を用いて800℃～950℃でAlN基板にCuを接合し、Cu/AlN接合界面構造を評価した。また、Cu端子を超音波溶接した際の破壊確率に基づく相対強度および水滴試験によるECM耐性を評価した。Cu/AlN接合界面には接合温度およびTi層厚さに依存して、非晶質P-Ti-O相、非晶質Ti-O相、Rutile TiO₂、Rock-salt TiO₂N_xおよびTiNが形成されることを示した。固相中の反応により非晶質(P-)Ti-O相から発達するRutile TiO₂が界面構造を支配することにより、超音波溶接後のCu/AlN接合界面の剥離確率は0%を達成した。また、Ag-free接合材を用いた接合法はAMB法と比較して約3倍のECM耐性が期待されることを示した。

第6章では本研究で得られた結果を総括し、結論を述べた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (寺 崎 伸 幸)			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教授	関野 徹
	副 査	教授	小泉 雄一郎
	副 査	教授	藤井 英俊
	副 査	准教授	後藤 知代
論文審査の結果の要旨			
本論文は、パワーモジュール用セラミックス絶縁基板として用いられる、銅 (Cu) と窒化アルミニウム (AlN) が活性ろう付け (Active metal brazing: AMB) された Cu/AlN 接合基板について、高耐圧用途を想定した銀フリー (Ag-free) 接合材を用いた際に形成される接合界面のミクロからナノおよび原子スケールに及ぶ多様な構造の解析、形成機構および力学的性質との相関関係に関する研究をまとめ、以下のとおり緒論、総括を含む全 6 章から構成されている。 第 1 章では、様々なセラミックス絶縁基板と金属との接合界面構造について述べ、Cu/AlN 接合界面構造に対する Ag 量および Ti 量の影響、Ag の Electrochemical migration (ECM) による絶縁破壊の潜在リスクとその本質的な対策と期待される Ag-free 接合材を用いる Cu/AlN 接合界面における重要性を示している。 第 2 章では、AMB 法による Cu/AlN 接合界面形成に必要な TiN 層の成長メカニズムを明らかにするため、Ag-Cu-TiH₂、Ag-TiH₂ および Cu-TiH₂ ペーストを金属層として AlN 基板へ印刷塗布し、熱処理に伴い形成される TiN 層の粒界相に着目した組織観察を行っている。AlN 基板へのろう付けおよび固相焼結反応過程によらず、AlN 基板内部へ成長した TiN 層は、TiN 粒子のほか Ag、Cu を主成分とする粒界相から構成されること、これら粒界相には AlN 基板からの Al が濃度分布を持って固溶すること、形成される TiN 層の成長に Al-Ag (Cu) 共晶液相が寄与することを明らかにしている。 第 3 章では、TiN 層の形成に及ぼす TiN 粒子形成過程および金属成分が与える影響を明確にするため、金属粒界相を含まない TiN 固相焼結セラミックス、TiN-Fe-NiC-Mo₂C 液相焼結セラミックスおよび WC-Co 超硬合金のそれぞれへ、Cu を Ag-Cu ろう付けし、形成する界面構造を精査している。TiN 固相焼結体へはろう付けが実現されず、ろう材層と TiN 粒子の接合には機械的接合より化学的接合の寄与が大きいことを明らかにしている。一方、TiN 液相焼結体のろう付け界面には、Cu/Fe 含有偏析層/TiN 粒子界面構造および Ag/Cu 含有偏析層/Fe 含有偏析層/TiN 粒子界面構造が形成されることを示している。WC-Co 超硬合金においてもセラミック粒子表面改質による偏析層が形成することを検証し、Ag-free 接合において Cu/セラミック表面改質相/セラミック界面構造の形成が一般的な構造であることを考察している。 第 4 章では、Ag-free 接合材および Fe 添加 Ag-free 接合材を用いた Cu/AlN 接合界面の構造と接合強度に与える影響を明らかにするため、AlN 基板と Mg-Ti (-Fe) 共蒸着膜を形成した Cu 基板とを接合し、AMB 基板と同様に Cu/AlN 接合界面には TiN 粒子と Cu 含有粒界相から構成される TiN 層が形成され、TiN 粒子表面は Mg または Fe によって改質されることを明らかにしている。Fe 未添加の場合、ピール強度は形成する TiN 層厚さには依存せず接合温度の上昇に伴い向上すること、Cu/AlN 接合界面の破断は TiN 層/AlN 界面で生じ、AlN 表面に形成された Mg-O 相の発達により抑制されることを明らかにしている。一方、Fe 添加の場合、AlN 表面には Mg-O 相ではなく Mg-Fe-O 相が発達していること、この寄与によりピール強度は最大で約 1.8 倍に向上することを明らかにしている。 第 5 章では、Ag-free 接合材の構成成分の影響を明らかにするため、Cu-P-Sn-Ni ろう箔および Ti 層を用いて AlN 基			

板と Cu 基板とを接合し、Cu/AlN 接合界面には、接合温度および Ti 層厚さに依存して非晶質 P-Ti-O 相、非晶質 Ti-O 相、ルチル型 TiO_2 、岩塩型 TiO_xN_y および TiN が形成されることを明らかにしている。さらに、固相中の反応により非晶質 (P-)Ti-O 相から発達するルチル型 TiO_2 が界面構造を支配すること、この結果、超音波溶接後の Cu/AlN 接合界面の剥離確率 0%を達成し、Ag-free 接合材を用いた接合法は従来の AMB 法と比較して約 3 倍の ECM 耐性が期待できることを示している。

第 6 章では研究成果を総括し、活性ろう付け法による構成元素が界面形成に及ぼす特徴、影響とその機序をまとめ、接合界面における構造の一般化を行い、結論を述べている。

以上のように、本論文はパワーモジュール用途としての Cu/AlN 接合基板における Ag-free 接合材が関与するミクロ、ナノおよび原子スケールでの界面構造の特徴とその形成に与える影響、および材料学的なメカニズムを明らかにすると共に、形成される構造の一般化を行うなど、高性能な接合界面・接合体形成のための学術的および工学的な重要な知見を得ており、材料科学・工学分野の発展に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。