

Title	Thermal degradation mechanisms of package materials for high-temperature power modules
Author(s)	崔, 讚揚
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76530
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (崔 讚 揚)

論文題名

**Thermal degradation mechanisms of package materials
for high-temperature power modules**
(高温パワーエレクトロニクスに向けたパッケージ材料の故障メカニズム)

論文内容の要旨

With the increasing use of wide-bandgap (WBG) semiconductor devices which provide great opportunities to develop power electronic systems with increased power densities and higher integration, the development of high-temperature-operating power devices allows for the use of power modules at high temperatures above 250 °C. Under high-temperature exposure, large thermal stress occurs in the power module due to coefficients of thermal expansion (CTE) mismatch in multiple layers, leading to thermal damage. This thesis describes thermal degradation mechanisms in the joint and substrates under high-temperature. In addition, novel damage real-time monitoring method by using acoustic emission technique is presented.

At first, for evaluating thermal degradation mechanisms in sintered micro-porous silver regarded as promising joint materials for high-temperature power modules, its mechanical/electrical properties deterioration and microstructural variations were investigated under high-temperature exposure and correlated. Sintered silver was fabricated in a specimen shape of a tension test. The sintered silver was exposed until 1000 h at 250 °C. The tensile strength decreased and again recovered during high-temperature exposure, while the electrical resistivity decreased. For microstructure evolution, sintered silver grains, porous structure, and fracture surface were characterized by SEM and EBSD. The relationship between microstructural variations and mechanical/electrical properties was discussed.

The thermal shock damage mechanism in DBA and AMB substrates with two types of plating—Ni electroplating and Ni-P electroless plating—was evaluated by thermal shock tests between -50 and 250 °C. AMB substrates with Al₂O₃ and AlN fractured after 10 cycles, but with Si₃N₄ ceramic, they retained good thermal stability even beyond 1000 cycles, regardless of the metallization type. The Ni layer on the surviving AMB substrates with Si₃N₄ was not damaged, while a crack occurred in the Ni-P layer. For DBA substrates, the fracture did not occur up to 1000 cycles for all kinds of ceramics. On the other hand, the Ni-P layer was roughened and cracked according to the severe deformation of the aluminum layer, while the Ni layer was not damaged after thermal shock tests. In addition, the deformation mechanism of an Al plate on a ceramic substrate was investigated both by SEM and FEM, which confirmed that grain boundary sliding was a key factor in the severe deformation of the Al layer that resulted in the cracking of the Ni-P layer. The fracture suppression in the Ni layer on DBA/AMB substrates can be attributed to its ductility and higher strength compared with those of Ni-P plating.

Finally, the wear-out damage mechanism in power devices was evaluated during power cycling test (PCT) and acoustic emission (AE) was applied to monitor the damage in real-time for the first time. The discrete devices were fabricated by using SiC diode, Ag sintering die-attachment, and Al ribbon interconnection. PCT was carried out with a harsh junction temperature swing of Δ 150 °C to accelerate damage occurrence and AE signals were collected simultaneously by the AE sensor that attached to the discrete devices. The AE cumulative counts were increased with the cycle number during PCT, while thermal fatigue crack in Al ribbon was propagated. The relationship between the AE count rate and the observed fatigue crack propagation was confirmed. The result demonstrates that AE evaluation can be used for not only understanding the fatigue progress of Al ribbon but also monitoring the failure of power electronic devices.

In this thesis, the results suggest new damage mechanisms for sintered micro-porous Ag and Ni metalized DBA/AMB substrates under high-temperature and additionally propose a novel AE monitoring method for thermal fatigue damage in power modules.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (崔 讚 揚)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	菅沼 克昭 (産業科学研究所)
	副 査	教授	宇都宮 裕
	副 査	教授	平田 勝弘
	副 査	教授	中谷 彰宏
	副 査	准教授	長尾 至成 (産業科学研究所)
	副 査	准教授	菅原 徹 (産業科学研究所)

論文審査の結果の要旨

SiCやGaNなどのWBGパワー半導体は、その特性を生かす電力変換エネルギーロス削減効果などにより、今後の幅広い実用化が期待されている。その性能を生かすためにエネルギー密度は著しく上昇するため、デバイスには250℃を超える動作が期待される。この著しい温度上昇に耐えるパッケージ構造の確立が急務であり、特に、熱応力によりモジュールを構成する各部位の高温信頼性に課題が残っているの。本論文では、WBGパワー半導体の250℃を超える動作実現するため、パッケージを構成する材料の故障メカニズムの明らかにすることを旨とし、以下の成果を得た。

1. 焼結銀接合の熱的劣化メカニズムを評価するために、高温放置と相関関係にある機械/電気特性劣化及び微細構造変化を高温環境(250℃-1000時間)で調査した。強度は初期に減少するが高温放置中に回復し、電気抵抗率は減少した。焼結銀の結晶粒および多孔性構造の微細組織観察により、これらの特性変化が説明される。
2. 各種絶縁基板 DBA、DBC を-50℃から 250℃の間の熱衝撃試験評価を行い、DBA 基板の優れた耐熱衝撃性を見出した。ただし、Al 板上の Ni-P 無電解めっきは厳しい割れが生じ、Al 板の激しい変形によるものである。Al 板の変形は、Al 粒界すべりに起因することを明らかにした。有限要素法(FEM)シミュレーションによって、この Ni-P めっきの亀裂生成メカニズムを明らかにした。
3. 実装構造のパワーサイクルにおいて発生する微小超音波信号を検出し (E)、高温パワーモジュールの故障をリアルタイムでモニタリングする音響検出法を開発した。SiC ヒータチップを用いた実装構造を用い、175℃を最高温度とするパワーサイクル中の AE を評価したところ、徐々にリボン配線側の界面剥離で生じる AE を検出出来ることが確認された。

以上のように本論文は、250℃までの高温環境において、特に温度衝撃やパワーサイクルで生じる厳しい熱応力によるパワー半導体実装構造の故障メカニズムを明らかにした。また、リアルタイムで実装構造の劣化を検出するAEモニタリング技術を提案し、その有効性を証明している。

よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。