

令和 2 年 7 月 5 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06843

研究課題名(和文) パワーモジュール用Agナノ粒子焼結接合部の疲労き裂進展寿命予測手法の確立

研究課題名(英文) Life prediction of fatigue crack propagation of sintered Ag nanoparticles for power module die attach

研究代表者

苅谷 義治 (Kariya, Yoshiharu)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：60354130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高温動作が可能なSiCパワー半導体モジュールのダイアタッチ接合として期待されるAgナノ粒子焼結接合部の熱疲労き裂進展寿命予測手法を検討した。まず、ダイアタッチ接合部の疲労信頼性予測に必要な疲労き裂進展の駆動力として、FEM解析により容易に算出可能であり、かつ負荷条件および構成式の種類によらず使用できる $W_{Near-field}$ を提案した。続いて、 $W_{Near-field}$ を駆動力とする疲労き裂進展則を実験により求めた。製品寿命設計においては、この $W_{Near-field}$ をFEM解析で計算し、疲労き裂進展則により疲労寿命が予測可能となることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案する評価手法により、製品状態における疲労寿命をFEM解析を通じて精度良く予測することができるため、提案した手法は疲労信頼性に優れるAgナノ粒子焼結材料を開発する上で有効な手段となる。これにより、Agナノ粒子焼結材料の開発が加速し、高温動作パワー半導体モジュール開発が進む。また、パワー半導体モジュール分野のみならず、FEM解析により容易に算出可能であり、かつ負荷条件および構成式の種類によらず使用できる $W_{Near field}$ は、FEM解析を用いた疲労信頼性に対して有効な手法となり、疲労信頼性分野の発展に貢献する。

研究成果の概要(英文)：The thermal fatigue crack propagation life prediction technique of Ag nanoparticle sintered joint expected as a die attach of SiC power semiconductor module for high temperature operating usage was examined. First, $W_{Near field}$, which is easily calculated by FEM analysis and can be used regardless of load conditions and types of constitutive equations, was proposed as a driving force of fatigue crack propagation to be used for fatigue life prediction of die-attach joint. Then, the fatigue crack propagation law with $W_{Near-field}$ as the driving force was obtained by the experiment. In the product life design, it was shown that the fatigue life could be predicted by the fatigue crack propagation law using $W_{Near-field}$ calculated by FEM analysis.

研究分野：電子実装の信頼性

キーワード：パワー半導体モジュール ダイアタッチ 疲労信頼性 疲労き裂進展則

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電気自動車 (EV)、鉄道の性能はモーター、バッテリーの性能のみならず、電力半導体モジュールの性能の影響が大きい。電力半導体モジュールは電力変換に伴う発熱から保護するため、大型の冷却構造が必要となる。近年、高温動作が可能である SiC および GaN が開発され、高温動作による冷却構造の小型化が期待されているが、高温動作に耐えるダイアタッチ接合技術が開発されていない。従来、ダイアタッチ材料には、はんだ合金が用いられてきたが、低融点であるはんだは熱疲労などの信頼性が確保出来ないため、Ag ナノ粒子が融点より遙かに低い温度で焼結する現象を利用して接合する方法が検討されている。Ag ナノ粒子焼結材料に関して、研究は行われるようになりつつあるが、パワーモジュールで重要となる Ag ナノ粒子焼結体の熱疲労き裂進展の特性に関する研究は実験が困難なため行われておらず、信頼性という観点からの適切なアプローチによる材料開発が進んでいない。世界に先駆けて高温動作パワーモジュール用 Ag ナノ粒子焼結接合材料を開発するために、熱疲労き裂進展特性を解明し、寿命予測手法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

電気自動車や鉄道車両の高性能化には低電力損失で高温動作可能なパワーモジュールの開発が必要であるが、半導体を接合する高耐熱のダイアタッチ材が開発されておらず、その開発が切望されている。その有力候補として Ag ナノ粒子焼結材料の開発が進められているが、力学特性が解明されておらず、実装後の熱疲労き裂進展寿命設計が行えないことが開発の障害となっている。本研究では Ag ナノ粒子焼結材料の力学特性を疲労き裂進展特性を中心に解明し、熱疲労き裂進展寿命予測手法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) Ag ナノ粒子焼結材料

供試材には、平均粒径 100nm の Ag ナノ粒子ペーストを用いて、無加圧、大気圧環境下にて焼結温度 473K で焼結することにより板状の焼結体とした。これを独自に開発した微小疲労き裂進展試験法で計測するため、ミニチュアサイズの片側切り欠き付き平板 (SEN) 試験片 (幅 3mm, 長さ 9mm, 厚さ 0.1mm) に加工し、疲労き裂進展試験に供した。

(2) 疲労き裂進展試験

疲労き裂進展試験にはアクチュエータに変位拡大機構付きピエゾステージを用いた疲労試験機を使用した。疲労き裂進展試験は、変位制御型の疲労試験とし、疲労き裂長さを試験機上部に設置した一軸垂直光路方式の顕微鏡およびビデオカメラを用いて、所定のサイクル数毎に測定した。試験温度は、低温環境として 298K, および高温動作環境として 473K の 2 水準とした。

4. 研究成果

(1) 疲労き裂進展の駆動力のパラメータ

小規模降伏を超える荷重負荷条件では、破壊力学パラメータに J 積分範囲, ΔJ が用いられる。しかし、実構造における ΔJ の算出方法は、クリープや除荷への対応に関する困難さが伴ため、まず、 J 積分のエネルギー項である非弾性ひずみエネルギー密度をパラメータとした、FEM で算出が用意な新たなパラメータを検討した。小規模降伏条件を超える場合、き裂先端周囲に HRR 特異場が形成され、その領域における応力とひずみは、距離 r に対し、それぞれ $(1/r)^{1/(n+1)}$ および $(1/r)^{n/(n+1)}$ に比例する。ひずみエネルギー密度 W は応力をひずみで積分して算出されるため、 W は r に反比例の特異性を示す。図 1 に示すようにき裂先端を囲む正方領域における各要素のひずみエネルギー密度の要素解を体積平均して W を算出する場合、 r は W を算出する正方領域の 1 辺の長さ L_{area} に置き換えられるため、 W は L_{area} に反比例する。比例係数を W_c とすると、 W_c は L_{area} と要素サイズに依存しないため、 J 積分と同様の経路独立的な性質を有する。疲労き裂進展では 1 サイクルあたりの W_c の変化量 ΔW_c を用いて評価が可能となる。しかし、除荷過程による HRR 特異場消失の影響が無視出来なく、また、クリープ変形で応力指数が応力に依存する場合、応力指数一定を仮定した HRR 特異性から導かれる ΔW_c の有効性は失われる。そこで本研究では、図 2 に示すように、き裂先端を囲む第 1 領域およびその内側の第 2 領域からそれぞれ ΔW を取得し、 ΔW と L_{area} のべき乗関係から外挿してき裂先端ごく近傍場の $\Delta W_{Near\ field}$ を算出する方法を提案した。図 3 に示すように、 ΔW_{Near}

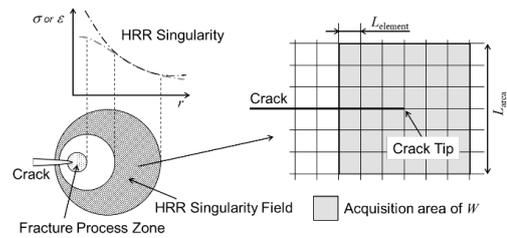


図 1 き裂先端特異場とひずみエネルギー密度取得。

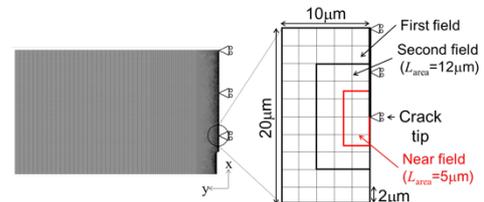


図 2 $\Delta W_{Near\ field}$ の取得のための領域設定。

field は、除荷が無視出来ない弾塑性条件であっても、第 1 領域の L_{area} に依存せず一定となり、経路独立的性質を示す。 $\Delta W_{Near\ field}$ は HRR 特異性が消失した場合でも一義的に定まるため、負荷条件および構成式の種類によらず使用できる有効な疲労き裂進展の駆動力となる。パワーモジュールダイアタッチ接合部の疲労信頼性予測では、FEM 解析により $W_{Near\ field}$ を算出し、 $W_{Near\ field}$ を用いた疲労き裂進展則より寿命を計算すれば良い。

(2) 疲労き裂進展特性

図 4 に試験温度 298K および 473K における未時効材および時効材の疲労き裂進展速度と $\Delta W_{Near\ field}$ の関係を示す。

いずれの試験温度においても疲労き裂進展速度と $\Delta W_{Near\ field}$ の間には Paris 則型の疲労き裂進展則が成立した。298K では、時効処理を施すことで疲労き裂進展速度は遅くなった。また、直線の傾きであるべき指数は 3 以上のはんだより大きな値を示し、さらに、時効により 5.4 に増加している。この結果から、時効処理により疲労き裂進展抵抗が増加するが、脆性的な性質となる。未時効材では、組織中にネック部が多く存在する。ミクロスケールモデル FEM 解析から、未時効材では、ネック部のひずみ集中の連結により、引張試験における破断延性が非常に小さく、また、延性金属より脆性的な疲労き裂進展特性となる。他方、時効処理後は、焼結の進行によるネック部消滅による強度上昇が起こる。ネック部消滅と粒界の強度の上昇は、疲労き裂進展に対する抵抗となるため、時効処理を施すことで疲労き裂進展速度が低下し、また、疲労き裂発生寿命が増加する。ただし、時効材では、大きな細孔を経由するため、やや脆性的な疲労特性となり、べき指数が大きくなったと考えられる。

473K では、未時効材のべき指数が 298K の値より減少するのに対し、時効材のべき指数は 298K の値より増加している。また、473K の未時効材のき裂進展速度は 298K の速度より低下するのに対し、時効材では試験温度の上昇により疲労き裂進展速度は増加する。この結果、低エネルギー密度域では時効材の疲労き裂進展抵抗が優れるが、高エネルギー密度域ではその差は少なくなる。Ag ナノ粒子焼結体は室温付近からクリープ変形を開始し、試験温度が 373K 付近から、変形はクリープが支配的となり、ネック部での粘性的な挙動によりネック部のひずみ集中が緩和されることで、延性的な挙動となる。他方、時効処理後は、ネック部が消滅し、未時効材のようなネック部で粘性的な挙動は無く、微細粒材料の粒界破壊の特性が表れていると考えられる。一般に多結晶材料の高温疲労破壊では、粒界すべりによる破壊が生じやすくなり、疲労寿命が低下する。これと同様に、時効材では試験温度上昇により破壊し易い特性が表れ、疲労き裂進展速度が増加したと考えることができる。時効処理を施すことで結晶粒径が増加するとともに、細孔が成長することにより、細孔間に存在する結晶粒の数が減少する。そのため、時効材では、細孔間に存在する粒界が少なくなり、粒界破壊を起こすと、き裂が細孔を連結し易くなり、疲労き裂進展速度は増加し、かつ、脆性的となることにより、ややべき指数が増加する。時効により疲労き裂進展特性が変化するため、安全側の設計を行うには、時効後の疲労き裂進展則を用いて、製品寿命予測を行うことが必要である。

(3) 結論

パワーモジュールダイアタッチ接合部の疲労信頼性予測に必要となる疲労き裂進展の駆動力に関し、FEM 解析により容易に算出可能であり、かつ負荷条件および構成式の種類によらず使用できる $W_{Near\ field}$ を提案した。製品寿命設計においては、この $W_{Near\ field}$ を FEM 解析で計算し、 $W_{Near\ field}$ を駆動力とする疲労き裂進展則により疲労寿命を計算する。本研究では、 $W_{Near\ field}$ を駆動力とする Paris 則型疲労き裂進展則を実験により求めた。Ag ナノ粒子焼結体の疲労き裂進展特性ははんだ合金に比較して、Paris 則のべき指数が大きく、脆性的であることがわかった。これは、ネック部の応力集中によるき裂進展のし易さに起因する。ただし、高温環境では粘性的なクリープ変形により脆性的性質が改善されるが、時効後は、結晶粒および細孔粗大化のため、再び脆性的な性質となる。製品設計においては、時効による組織変化を考慮する必要があり、時効後の疲労き裂進展則を用いる必要がある。本研究の評価手法により、製品状態における疲労寿命を FEM 解析を通じて予測することができるため、本研究の手法は疲労信頼性に優れる Ag ナノ粒子焼結材料を開発する上で有効な手段となる。

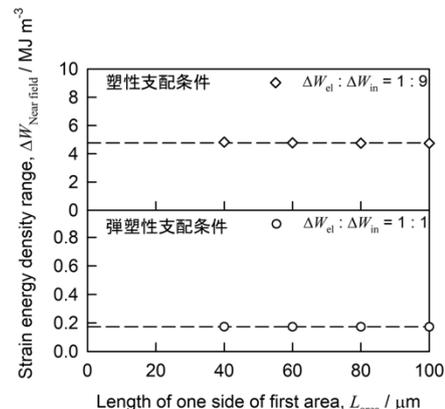


図 3 $\Delta W_{Near\ field}$ と第一領域の長さの関係。

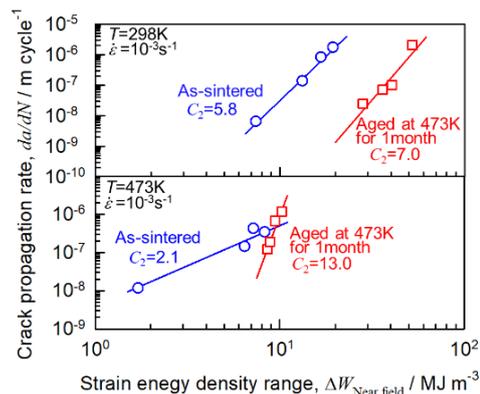


図 4 $\Delta W_{Near\ field}$ と疲労き裂進展速度の関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 R. Kimura, Y. Kariya, N. Mizumura, K. Sasaki	4. 巻 59
2. 論文標題 Effect of sintering temperature on fatigue crack propagation rate of sintered Ag nanoparticles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 612-619
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017392	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大崎滉二, 苅谷義治, 水村宣司, 佐々木幸司
2. 発表標題 無加圧焼結されたAgナノ粒子焼結体の高温疲労き裂進展特性
3. 学会等名 第25回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久我敦, 苅谷義治, 水村宣司, 佐々木幸司
2. 発表標題 無加圧焼結したAgナノ粒子焼結体のクリープ変形機構の検討
3. 学会等名 第25回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤隆彦, 苅谷義治
2. 発表標題 エネルギー密度を基準とした要素削除による疲労き裂進展解析手法の検討
3. 学会等名 第25回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村 良, 苅谷 義治, 水村 宜司, 佐々木 幸司
2. 発表標題 無加圧焼結されたAgナノ粒子焼結体の疲労き裂進展速度におよぼす温度の影響
3. 学会等名 日本金属学会2017年度秋期講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村 良, 苅谷 義治, 水村 宜司, 佐々木 幸司
2. 発表標題 Ag ナノ粒子焼結体の疲労き裂進展速度におよぼす焼結温度の影響
3. 学会等名 第 2 4 回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Osaki, Yoshiharu Kariya, Noritsuka Mizumura, Koji Sasaki
2. 発表標題 High Temperature Fatigue Crack Propagation Characteristics of Pressureless Sintered Silver Nanoparticles
3. 学会等名 2019 6th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大崎滉二, 苅谷義治, 水村宣司, 佐々木幸司
2. 発表標題 無加圧焼結された Ag ナノ粒子焼結体の高温疲労き裂進展特性
3. 学会等名 第29回マイクロエレクトロニクスシンポジウム 秋季大会 (MES2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----