

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04182

研究課題名（和文）パワー半導体デバイスダイアタッチ接合部の疲労き裂ネットワーク破壊寿命予測法の確立

研究課題名（英文）Establishment of Fatigue Crack Network Fracture Life Prediction Method for Power Semiconductor Device Die-Attach Joint

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：ダイアタッチ接合部の疲労き裂ネットワーク破壊機構を解明することを目的に、ダイアタッチ接合部の高速温度サイクル試験を実施し、疲労き裂ネットワークが等2軸応力による連続的なき裂発生とそれらき裂の進展・連結により形成することを解明した。この破壊を拡張体積理論を用いて表し、疲労き裂ネットワーク形成による損傷発展を予測することが可能であった。さらに、疲労き裂ネットワークに対応できる損傷発展型FEM解析を提案した。本手法により、疲労き裂ネットワーク破壊特有の損傷発展が再現された。本手法はダイアタッチ外周部からのき裂進展型の損傷にも適用でき、ダイアタッチ接合部の疲労寿命予測手法の確立に向けた指針が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代パワー半導体デバイスダイアタッチ接合部の新たな破壊である疲労き裂ネットワークの機構を解明し、その寿命予測方法を確立した。この寿命予測法は均一応力場でロジスティック曲線型にき裂がランダムに発生し、損傷が進展するという従来にはない新しい手法であり、学術的意義が高いものである。また、このダイアタッチ接合部の疲労き裂ネットワーク破壊の寿命予測が可能となることで、高性能なパワー半導体の開発が進み、エネルギーの効率利用に対して貢献することができる。エネルギーの効率利用は脱炭素社会の実現に不可欠であり、本研究成果は社会的に意義の高いものである。

研究成果の概要（英文）：High-speed thermal cycling tests were conducted on die attach joints to elucidate the mechanism of fatigue crack network failure in die attach joints. It was clarified that the fatigue crack network is formed by continuous crack initiation due to equibiaxial stress and the propagation and connection of these cracks. The extended volume theory was used to describe the fracture and predict the damage development due to the fatigue crack network formation. Furthermore, a damage development type FEM analysis corresponding to fatigue crack networks was proposed. This method reproduced the damage development specific to fatigue crack network failure. This method can also be applied to crack propagation damage from the periphery of the die attach, and a guideline for establishing a fatigue life prediction method for die attach joints was obtained.

研究分野：電子実装

キーワード：ダイアタッチ 熱疲労 パワーサイクル パワー半導体 FEM 寿命予測

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、鉄道インフラ、電気自動車、再生可能エネルギー発電などの電力制御を行うパワー半導体デバイスの国際競争力強化が極めて重要となり、高性能なデバイス開発が急務となっている。パワー半導体デバイスは、半導体動作温度の上限に収まるように、冷却されている。半導体ダイは絶縁基板にはんだ合金などによりダイアタッチ接合されるが、その接合部では、通電サイクルによる動作温度の変化により疲労破壊が生じ、これにより半導体ダイの熱を放熱構造へ伝達できなくなり、デバイスが故障に至る。この接合部の疲労がパワー半導体デバイスの性能を決定し、その寿命予測法の確立がデバイス開発の重要項目の一つとなっている。

従来、ダイアタッチ接合には Pb 基はんだ合金が用いられ、その破壊は半導体ダイと絶縁基板間の熱膨張係数差によるダイアタッチ材のせん断変形により接合部端から半導体ダイに対して水平に疲労き裂が進展することで起こる。この水平き裂進展に対して製品寿命を求める設計がされている。しかし、最近になり、ダイアタッチ接合鉛フリーはんだ合金を用いたパワー半導体では、ダイアタッチ中央部からネットワーク状に疲労き裂が発達する新しい破壊が起こることが報告されるようになった。従来、寿命設計は半導体ダイと絶縁基板間の熱膨張係数差によるダイアタッチ材の水平き裂進展に対して行われてきた。しかし、次世代パワー半導体デバイス開発では、新たな破壊である疲労き裂ネットワークの機構が不明およびその寿命予測法が無く、製品開発に支障をきたしている。疲労き裂ネットワーク破壊の寿命予測手法の確立が切望されているが、その研究は今日まで全く進んでいない。次世代高温動作パワーデバイス開発のために、この疲労き裂ネットワーク破壊に関する詳細な研究が切望されている。

2. 研究の目的

本研究では新たに発見されたダイアタッチ接合部の疲労き裂ネットワーク破壊の破壊機構を解明し、その破壊機構に基づいた寿命予測の数理モデルを作成する。さらに、従来型パワー半導体モジュールにおける既往の水平き裂進展も含め、FEM 解析を通じて、構造と材料により、疲労き裂ネットワーク、水平き裂進展の何れとなるかの基準を明確化し、総合的なダイアタッチ接合部のパワーサイクル寿命予測法として最終提案することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 0.625\text{mm}$ の Si チップ 2 枚を厚さ $300\mu\text{m}$ のはんだで接合した Si/Solder/Si 接合体試験片に対しパワーサイクルを模擬した高速温度サイクルを負荷する試験を行い、疲労破壊を観察した。この高速温度サイクル試験を所定のサイクル数毎に中断し、X 線透過像を撮影し、き裂の発生および進展を観察した。なお、ダイアタッチ材料には、 $\text{Sn-3.0mass\%Ag-0.5mass\%Cu}$ はんだ合金を用いた。

4. 研究成果

(1) 疲労き裂ネットワーク破壊の破壊機構

図 1 に各温度条件における所定サイクル後のはんだ層の X 線透過像を示す。像の中の白色部がき裂である。なお、それぞれの像は個別の試験片で観察したものであり、同一の試験片を連続的に観察したものではない。サイクルの進行に従い、き裂の数が増え、それらき裂が進展、連結し、疲労き裂ネットワークが形成した。また、温度範囲が大きい条件ほど、き裂が早いサイクルで現れ、疲労き裂ネットワークが短いサイクルで形成した。

疲労寿命予測手法を構築するためには、破壊機構に基づいた損傷速度式を検討する必要がある。ここで、疲労き裂ネットワーク形成機構を検討する。高速温度サイクル昇温過程では、はんだ層は、全域において、接合面に対して平行方向に 2 軸圧縮応力状態、降温過程で 2 軸引張応力状態となる。降温時の引張変形により、等 2 軸応力が生じると、十字状にき裂が開口し、き裂が各き裂先端方向に進展することで損傷領域が広がる。そして、既存のき裂が進展しつつ、未損傷部に新たなき裂が発生・進展するため最終的に各き裂が連結し、疲労き裂ネットワークを形成する。また、疲労き裂ネットワークの発達過程において、き裂同士が連結すると、き裂近傍のひずみエネルギー密度の低下し、最終的に疲労き裂ネットワークの発達は飽和する。以上が疲労き裂ネットワーク損傷の機構である。

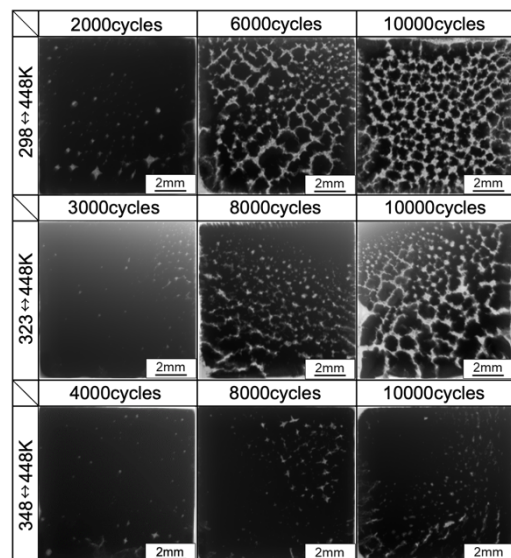


図 1 温度サイクル後の X 線透過像

(2) 損傷速度式

疲労き裂ネットワーク形成機構に基づいた損傷速度式の導出を検討する。ここでは、疲労き裂ネットワーク形成機構に基づき疲労損傷が以下の①～③に基づき発達すると仮定した。図2に疲労き裂ネットワークにおける損傷の考え方の模式図を示す。

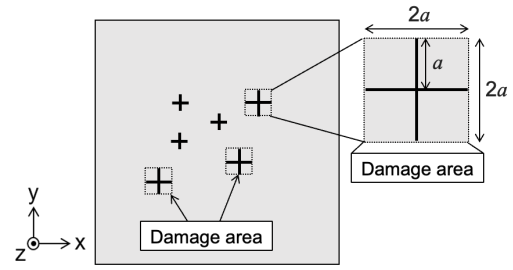


図2 疲労き裂ネットワーク損傷の模式図

- ①はんだ層が等2軸応力状態であり、き裂は図2のように十字状に進展し、それを囲む正方形を損傷領域と定義する。
- ②はんだ層厚さは接合面積と比較して非常に薄いため、損傷領域の発達は、はんだ層上面から見た平面方向の広がりのみ考える。
- ③新たなき裂は未損傷領域に発生し、十字状き裂は損傷領域(き裂)同士が衝突するまで等速で進展し、衝突後、き裂進展は停止する。

以上のように疲労き裂ネットワークが形成すると仮定し、損傷領域の成長と衝突による成長停止を拡張体積理論で表せると考え、損傷速度式を検討する。損傷域同士の衝突を考慮せず損傷域が成長した場合の損傷率を式(1)で記述し、これを拡張損傷率 S_e とする。

$$S_e = \sum S_i \quad (1)$$

ここで、 S_i は単一き裂当たりの損傷率である。新たなき裂発生箇所がすでに損傷した領域に含まれない確率、つまり未損傷部にき裂が発生する確率 U は、式(2)で記述される。

$$\ln U = \ln \prod_i (1 - S_i) = \sum_i \ln(1 - S_i) \quad (2)$$

損傷率 S_i は1よりも十分に小さい場合、 $\ln U$ は拡張損傷率を用いて式(3)で記述される。

$$\ln U = \sum -S_i = -S_e \quad (3)$$

既存の損傷率を S とすると、新たなき裂発生箇所がすでに損傷した領域に含まれない確率 U は、 $1 - S$ で与えられ、損傷率と拡張損傷率の関係は式(4)となる。

$$S = 1 - \exp(-S_e) \quad (4)$$

続いて拡張損傷率 S_e の具体的な形を検討する。損傷領域は十字状の疲労き裂進展により形成されるので、図2のようにき裂半長を a とし、き裂進展速度 da/dN を用いると、潜伏サイクル数 N_i において発生したき裂がサイクル数 N まで成長して形成する損傷域の面積 s は式(5)となる。

$$s = (2a)^2 = 4 \left(\frac{da}{dN} \right)^2 (N - N_i)^2 \quad (5)$$

また、サイクル数 N_i におけるき裂発生速度を $Y(N_i)$ とすると、サイクル数 N における拡張損傷率は式(6)となる。

$$S_e = \int_{N_i}^N Y(N_i) 4 \left(\frac{da}{dN} \right)^2 (N - N_i)^2 dN_i \quad (6)$$

式(6)を積分し、拡張損傷率式(7)を得る。

$$S_e = \frac{4}{3} Y \left(\frac{da}{dN} \right)^2 N^3 \quad (7)$$

最終的に、損傷率(損傷速度式)は(8)で与えられる。

$$S = 1 - \exp \left\{ -\frac{4}{3} Y \left(\frac{da}{dN} \right)^2 N^3 \right\} \quad (8)$$

導出した損傷速度式を用いて疲労き裂ネットワーク形成による損傷率とサイクル数の関係を求めた。図3に各試験条件における損傷率とサイクル数の関係と実験より得たサイクル毎の損傷率の比較を示す。図3に示すように(8)式の損傷速度式により各試験温度条件における損傷率とサイクル数の関係が再現された。本研究で提案する損傷速度式を用いて疲労き裂ネットワーク形成による損傷の発展を簡易的に予測することが可能であることがわかった。

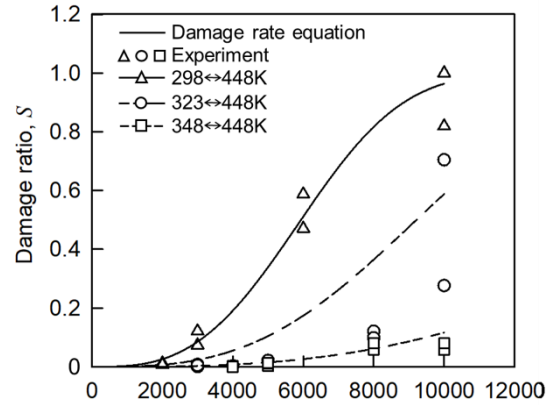


図3 損傷率とサイクル数の関係

(3) FEMを用いた損傷シミュレーション

本研究では、疲労き裂ネットワーク破壊の形成メカニズムに基づく損傷速度式を提案したが、製品開発においては、外周部からの水平き裂進展を含む FEM 解析を用いた汎用的なパワーサイクル寿命予測法が求められる。通常、FEM を利用した熱疲労寿命予測では、特定の応力集中部からき裂が発生すると仮定し、FEM で求めた応力やひずみを寿命則に代入し、単一き裂として寿命を求める。しかし、疲労き裂ネットワーク破壊では、均一な等 2 軸応力場で、ランダムにき裂発生を繰り返す、平面的に損傷発達しながらジャンクション温度が上昇し製品故障に至るため、応力集中部からの単一き裂による破壊という従来の寿命予測の考え方に従わず、新たな手法が必要である。そこで本研究では、さらに、疲労き裂ネットワーク破壊に対応できる損傷発展型 FEM 解析を提案し、ダイアタッチ接合部の疲労破壊の再現を試みた。

図 4 に損傷発展解析のイメージ図を示す。前述の疲労き裂ネットワーク破壊の破壊機構調査の成果から、各要素が十字に進展するき裂を囲む正方領域であると仮定し、各要素で損傷がき裂の発生と進展の 2 段階で発展していくように、式 (9) に従い損傷度の計算を行う。

$$D_i + D_p = D_{all} \quad (9)$$

ここで、 D_i はき裂発生における損傷度、 D_p はき裂進展における損傷度、 D_{all} は各要素における全損傷度である。き裂発生における損傷度は低サイクル疲労寿命則から求まる式 (10) の損傷発展式を用いて計算した。

$$\sum_i N_i \left(\frac{\Delta W_{in}}{C} \right)^{\frac{1}{\beta}} = D_i \quad (10)$$

ここで、 N_i は i 番目で加えられたサイクル数、 ΔW_{in} は非弾性ひずみエネルギー密度範囲、 β および C は定数である。

なお、疲労き裂ネットワークの破壊メカニズムに基づき、き裂はダイアタッチ中の均一応力場でランダムに発生する必要がある。図 5 に示すように、一般に、疲労寿命にはばらつきが存在し、寿命は統計分布に従う。ランダムな疲労き裂発生が統計分布におけるばらつきに起因すると仮定すれば、均一応力場でのランダムなき裂発生を再現できる。本研究では、疲労寿命のばらつきが正規分布で表せると仮定し、各要素に正規乱数を用いてき裂の発生抵抗を設定し、その抵抗値を満たした要素でき裂発生とする。寿命則で与えられる寿命を平均値とし、この場合のき裂の発生抵抗を 1 とする。標準偏差は高速温度サイクル実験結果をもとに設定し、正規乱数によりき裂発生抵抗を算出する。

次に、き裂発生基準を満たした要素で、き裂進展による損傷度 D_p を計算する。き裂進展による損傷発展は各要素内で十字状にき裂が進展すると仮定し、要素サイズに対するき裂進展長を損傷度 D_p とした。損傷度 D_p ははんだ合金の疲労き裂進展実験より求めた式 (11) に示す Paris 型の疲労き裂進展則とした。また、損傷度に応じて要素の弾性率を段階的に低下させることで、損傷発展に伴う要素の剛性低下を再現した。

$$\frac{dL}{dN} = C_1 \times \Delta W'_{in} C_2 \quad (11)$$

ここで、 L はき裂長さ、 N はサイクル数、 $\Delta W'_{in}$ は試験片ゲージ部総体の非弾性ひずみエネルギー密度範囲、 C_1 および C_2 は定数である。

上記手法により高速温度サイクル試験の疲労損傷シミュレーションを行った。図 6 に Si / Solder / Si のはんだ層の各サイクル数におけるき裂発生箇所および損傷領域を示す。初期き裂は 700 サイクル時に発生し、2600 サイクル時にダイアタッチ全面でき裂が発生した。その後、き裂が進展し、損傷はダイアタッチの全域へ進展し、4600 サイクル時にダイアタッチ全面で損傷が完了した。

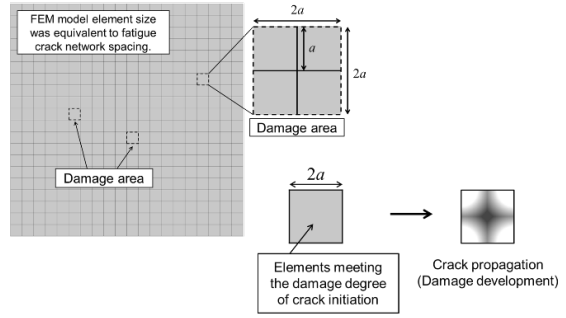


図 4 に損傷発展解析のイメージ図

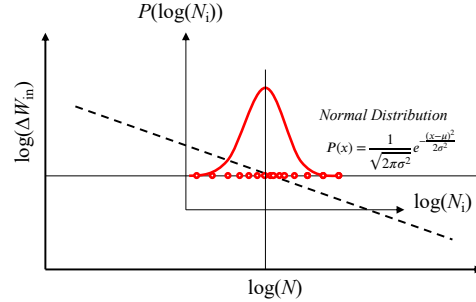


図 5 疲労寿命における統計的なばらつき

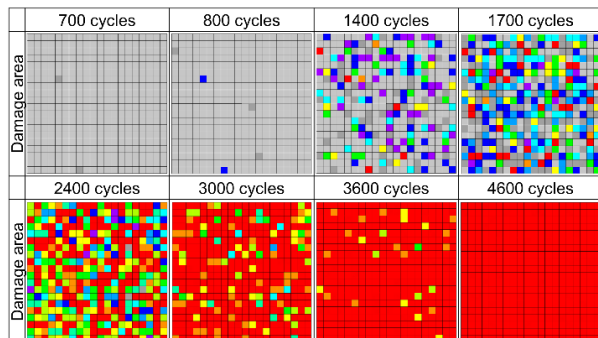


図 6 はんだ層の各サイクル数におけるき裂発生箇所および損傷領域

図 7 にき裂進展による損傷発展とサイクル数の関係を示す。損傷率は、実験同様、サイクル数に対してロジスティック曲線型の曲線となり、サイクル数の絶対値は完全には合っていないものの、FEMシミュレーションで疲労き裂ネットワーク破壊同様の損傷発展の再現を確認できた。サイクル数が一致しない原因としては、疲労き裂進展則の精度にあると思われる。今後、疲労き裂進展則の見直しを検討する。このように、本研究で提案する方法により、均一応力場でランダムにき裂発生を繰り返しながら損傷発展する疲労き裂ネットワーク特有の挙動を再現可能であった。

また、図 8 に、実験は行っていないが、ダイアタッチ端部からの水平き裂進展が予想される Si / Solder / Cu のシミュレーション結果を示す。き裂が外周部で発生し、そのき裂がダイアタッチ内部へ向けて進展することが確認された。本研究で提案するシミュレーションにより、疲労き裂ネットワーク破壊、また、従来報告されてきたダイアタッチ端部からの水平き裂進展の両方を再現することが可能であることが示唆された。

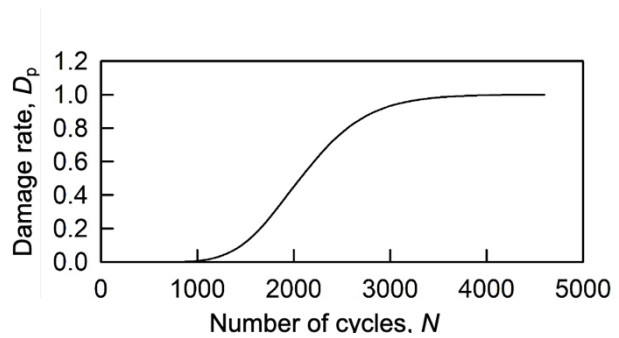


図 7 にき裂進展による損傷発展とサイクル数の関係

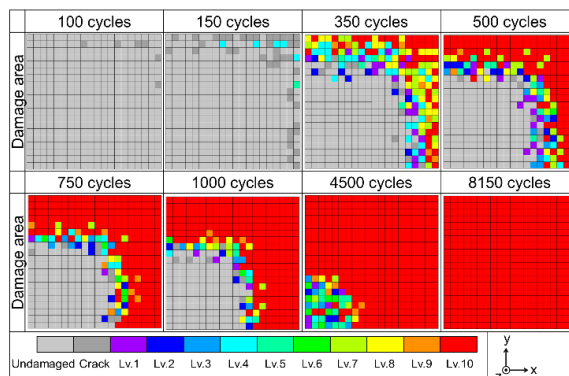


図 8 Si / Solder / Cu のシミュレーション結果

(4)結論

Si/Solder/Si 接合体試験片に対しパワーサイクルを模擬した高速温度サイクル試験を実施し、疲労き裂ネットワークが、高速温度サイクルにより生じる等 2 軸応力による連続的な十字状き裂発生とそれらき裂の進展、連結および停止により形成することが確認された。損傷領域の成長と衝突による成長停止を、拡張体積理論を用いて表し、損傷速度式を検討した結果、各試験温度条件における損傷率とサイクル数の関係が再現され、この損傷速度式を用いて疲労き裂ネットワーク形成による損傷の発展を簡易的に予測することが可能であることが示された。

また、疲労き裂ネットワーク破壊に対応できる損傷発展型 FEM 解析とし、均一な等 2 軸応力場でランダムに発生するき裂が正規分布のばらつきに起因すると仮定し、FEM の要素に正規乱数を用いてき裂発生抵抗を設定してき裂発生サイクルを計算し、さらに、疲労き裂進展則によりき裂発生要素の損傷を進展させる解析手法を提案した。本手法により、疲労き裂ネットワーク破壊特有のロジスティック曲線型の損傷発展が再現された。本手法はダイアタッチ外周部からのき裂進展型の損傷にも適用できるため、ダイアタッチ接合部の疲労寿命予測手法の確立に向けた指針が得られた。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 石原 奨, 苅谷 義治, 佐々木 幸司	4. 巻 2022
2. 論文標題 等2軸応力下におけるAgナノ粒子焼結体の熱疲労破壊挙動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 年次大会	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2022.J011-07	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石原 奨, 苅谷義治, 佐々木幸司
2. 発表標題 等2軸応力下におけるAgナノ粒子焼結体の熱疲労破壊挙動
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千島 祐也, 苅谷義治
2. 発表標題 電力半導体モジュールダイアタッチ接合部のパワーサイクル中の破壊形態と破壊駆動力
3. 学会等名 第33回マイクロエレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石原奨, 苅谷義治, 阿部慶樹, 佐々木幸司
2. 発表標題 繰り返し等2軸熱応力下におけるダイアタッチ材料の破壊挙動観察
3. 学会等名 第28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 2022年

1. 発表者名 阿部慶樹, 苅谷義治
2. 発表標題 等2軸心力下におけるSn-3.0Ag-0.5Cuはんだの熱疲労破壊
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演(第167回)大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三須俊幸, 苅谷義治, 福本晃久, 田屋昌樹
2. 発表標題 電力半導体ダイアタッチ接合部における疲労き裂ネットワーク損傷におよぼす接合部厚さの影響
3. 学会等名 日本金属学会秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船寺早紀, 苅谷義治
2. 発表標題 パワー半導体モジュールダイアタッチ接合部における破壊進行過程シミュレーション
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋期講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鷺田和哉, 苅谷義治, 佐々木幸司
2. 発表標題 Ag粒子焼結体の疲労き裂進展特性におよぼす内部微細構造の形状効果
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋期講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船寺早紀, 苅谷義治
2. 発表標題 等2軸応力を受けるダイアタッチ接合部の熱疲労破壊進行過程シミュレーション
3. 学会等名 第30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 2024年

1. 発表者名 鷲田和哉, 苅谷義治, 佐々木幸司
2. 発表標題 Ag粒子焼結体の疲労き裂進展速度におよぼす微細構造効果
3. 学会等名 第30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 2024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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------