

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 24 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420022

研究課題名(和文) マルチスケールにおける異種材接合界面強度評価

研究課題名(英文) Strength evaluation of an interfacial corner of jointed dissimilar materials considering the multi-scale effect

研究代表者

池田 徹 (Ikeda, Toru)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：40243894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)： 機械的応力下、熱応力下にある三次元の滑らかでない異方性異種材接合角部の漸近解におけるスカラーパラメーターの解析手法を開発した。また、パワーモジュールにおける樹脂と金属のはく離限界を界面き裂の応力拡大係数で測定し、パワーモジュール内ではく離の発生を推定する手法を開発した。これにより、長期間の試験時間を要する熱サイクル試験の結果を解析によって予測する方法の目処がついた。

さらに、分子静力学と転位弾性論を用いて、Si-Ge界面のミスフィット転位周りの応力を解析し、両者が良く一致することを確認した。ナノサイズの異種材界面では、連続体力学の理論では不十分なことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)： We developed numerical methods to analyze the scalar parameters of asymptotic solutions for three-dimensional corners along the bonded interface between dissimilar anisotropic materials under mechanical and thermal loads.

We measured the delamination toughness of an interface crack between metal and molding resin in a power module, and analyzed stress intensity factors of a critical crack in a power module under thermal stress. We can expect the delamination in a power module under thermal cycle test, which needs very long testing time.

We calculated the stress-strain fields around misfit dislocations between Si and Ge using the molecular statics and the dislocation elastic theory, and found out that those stress-strain fields obtained by two methods correspond each other. We need to take account of the difference of crystal lattice constants of bonded materials in the nano-scale.

研究分野：破壊力学、計算固体力学、電子実装工学

キーワード：界面 破壊 接合 応力拡大係数 パワーモジュール 信頼性 ナノ薄膜 ミスフィット転位

1. 研究開始当初の背景

異方性異種材接合角部については、C. Hwu が 2007 年にその応力拡大係数を提案し、H-integral による解析手法も提案している。研究代表者らもこの手法を一般の異方性材料と圧電材料に対して、熱応力場や、滑らかな 3次元問題に拡張するとともに、Hwu の応力拡大係数の定義をより実用的に改良したものを提案してきた。

一方、ナノ領域での異種材接合界面き裂や角部近傍の応力場の評価は、電子デバイス等の薄膜界面の性質の制御や、信頼性の向上のためにも重要である。研究代表者らは、分子静力学法を用いて分子スケールでの異種材接合界面き裂や接合界面角部近傍の応力場を解析し、接合分子の格子定数がほぼ等しい場合には、マクロスケールにおける接合界面き裂や接合界面角部の応力分布とほぼ等しいが、格子定数に差がある場合には、整合界面を得るために大きな応力が界面に働き、それを緩和するためにミスフィット転位が発生するためにマクロスケールでの応力とは全く異なったものとなることを明らかにしていた。

2. 研究の目的

マクロスケールにおける二次元および三次元異方性異種材接合界面き裂と接合界面角部の強度評価手法を確立する。また、ナノスケールでの異種材接合界面き裂と接合界面角部および界面上における応力分布を明らかにし、マルチスケールにおける異種材接合界面き裂と角部および界面の強度評価手法の提案を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 機械的応力下、熱応力下にある三次元の滑らかで無い異方性異種材接合角部のスカラーパラメーターの解析手法を開発する。
- (2) 応力拡大係数を用いて、パワー半導体における樹脂封止角部からのはく離強度の評価を行う。
- (3) 分子静力学法を用いて、ナノスケールでの異種材接合角部近傍と接合界面上の応力場の解析を行う。
- (4) ナノスケールでの異種材接合角部近傍と接合界面上の応力場を、マクロスケールでの接合角部近傍の応力場と転位の弾性論を用いて近似する弾性モデルを開発する。

4. 研究成果

機械的応力下、熱応力下にある三次元の滑らかでない異方性異種材接合角部の漸近解

におけるスカラーパラメーターの解析手法を開発した。これにより、二次元等方性異種材界面き裂、二次元異方性異種材界面き裂、三次元異方性異種材界面き裂と界面角部の全てについて、機械的、熱的応力下の漸近解を示すパラメーターの解析手法を世界に先駆けて開発した。

また、パワーモジュールにおける樹脂と金属のはく離限界を界面き裂の応力拡大係数で測定し、熱サイクル試験において、パワーモジュール内ではく離が発生する危険性を推定する手法を開発した。これにより、長期間の試験時間を要するパワーモジュールの熱サイクル試験の結果を解析によって予測する方法の目処がたった。

分子静力学と転位弾性論を用いて、Si-Ge 界面のミスフィット転位周りの応力を解析し、両者が良く一致することを確認した。ナノサイズの異種材界面では、両材料の結晶格子定数の差がひずみ場に大きな影響を与えるため、連続体力学の理論では不十分なことが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Mitsutoshi Abe, Toru Ikeda, Masaaki Koganemaru, Noriyuki Miyazaki, Stress intensity factor analysis of a three-dimensional interfacial corner between anisotropic piezoelectric multi-materials under several boundary conditions on the corner surfaces, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 171, 2017, Pages 1-21 (査読有) .

2. 古賀裕二, 田口陽介, 小金丸正明, 池田徹, 宮崎則幸, 三次元異方性異種材接合角部の特異応力場解析, *日本機械学会論文集*, Vol. 83, No. 845, No. 16-00382, 2017, pp. 1-17 (査読有) .

3. Toru Ikeda and Kenta Shiba, Reliable Material Properties of Aluminum Pads with Strong Delamination Toughness in Gold - Aluminum Wire Bonding, *Materials Transactions*, Vol. 57, No. 6, 2016, pp. 860-864 (査読有) .

4. 尾崎秋子, 池田徹, 河原真哉, 宮崎則幸, 畑尾卓也, 中井戸宙, 小金丸正明, 電子パッケージの反りが示す熱履歴によるヒステリシス挙動の解析手法の開発, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 18, No. 7, 2015, pp. 486-494 (査読有) .

[学会発表] (計 39 件)

1. 柳瀬 篤志, 池田 徹, 小金丸 正明, 苅谷 義治, 奥村 大, 数結晶よりなる微細すず

- 試験片のひずみ分布評価, 日本機械学会九州支部第70期総会講演会講演論文集, No. 178-1, 佐賀大学(佐賀県佐賀市), 2017.3.14, 2017, pp. 213-214.
2. 芝 健太, 定松 直, 小金丸 正明, 池田 徹, 原子スケールにおける異種材界面の応力場・ひずみ場評価, 日本機械学会九州支部第70期総会講演会講演論文集, No. 178-1, 佐賀大学(佐賀県佐賀市), 2017.3.14, 2017, pp. 205-206.
3. 古賀 裕二, 小金丸 正明, 池田 徹, *H-integral*による三次元接合角部のスカラーパラメーター解析, 日本機械学会九州支部第70期総会講演会講演論文集, No. 178-1, 佐賀大学(佐賀県佐賀市), 2017.3.14, 2017, pp. 201-202.
4. Masaaki Koganemaru, Koki Matsumoto, Masakazu Uchino, Toru Ikeda, Residual strain evaluation in electronic packages using X-ray images and phase-shifted sampling moiré method, 5th Joint Conference of the Research Center for Advanced Biomechanics & Japan Institute of Electronics Packaging Kyushu Branch, 九州大学(福岡県福岡市), March 3th, 2017 (Invited).
5. 池田 徹, 川下 隼介, 七蔵司 優斗, 小金丸 正明, 外菌 洋昭, 浅井 竜彦, パワーモジュールにおける封止樹脂のはく離強度設計, 第23回シンポジウム「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」Mate 2017, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2017.1.31-2.1, pp. 119-124.
6. 原 圭介, 今中 誠, 河野 洋輔, 池田 徹, アクリルおよびエポキシ系接着剤より接着された CFRP/アルミニウム接着継手の疲労き裂進展度, 自動車用途コンポジットシンポジウム, 同志社大学今出川キャンパス(京都府京田辺市), 2016.11.11, PP. 11-14.
7. 芝 健太, 池田 徹, 小金丸 正明, 異方性弾性論と分子静力学を用いたミスフィット転位が存在する異種材界面の応力場解析, 日本機械学会M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学(兵庫県神戸市), 2016.10.8-10, OS07-09.
8. 古賀 裕二, 池田 徹, 小金丸 正明, *H-integral* による三次元接合角部のスカラーパラメーター解析, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学(兵庫県神戸市), 2016.10.8-10, OS07-05.
9. 七蔵司 優斗, 池田 徹, 小金丸 正明, パワーモジュール中の銅基板と封止樹脂のはく離強度評価, 日本機械学会第29回計算力学講演会, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016.9.22-23, 026.
10. 川下 隼介, 池田 徹, 小金丸 正明, パワーモジュール中の熱応力による封止樹脂のはく離解析, 日本機械学会第29回計算力学講演会, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016.9.22-23, 025.
11. 井上 航太朗, 池田 徹, 小金丸 正明, 畑尾 卓也, 中井戸 宙, パワーデバイス中の封止樹脂のはく離強度評価, 日本機械学会第29回計算力学講演会, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016.9.22-23, 027.
12. 畑尾 卓也, 中井戸 宙, 中元 亜耶, 池田 徹, 尾崎 秋子, 電子部品における高耐熱樹脂のはく離信頼性評価解析, 日本機械学会第29回計算力学講演会, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016.9.22-23, 276.
13. 柳瀬 篤志, 池田 徹, 小金丸 正明, 数結晶粒よりなる微細すず試験片内のひずみ測定と変形挙動解析, 日本機械学会第29回計算力学講演会, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016.9.22-23, 032.
14. Toru Ikeda, Akiko Ozaki, Masaaki Koganemaru, Hiroshi Nakaido and Takuya Hatao, Delamination toughness between encapsulation resin and substrate for power devices at high temperature, The 37th IEMT and the 18th EMAP, Penang (Malaysia), September 20-22, 2016, C2.3.
15. 池田 徹, パワーデバイス用高耐熱樹脂のはく離強度評価技術, 日本機械学会 2016年度年次大会, 九州大学(福岡県福岡市), 2016.9.12-14, F012007.
16. 池田 徹, 尾崎 秋子, 小金丸 正明, 中井戸 宙, 畑尾 卓也, 高耐熱パワーデバイス用封止樹脂の密着強度評価, 日本機械学会 2016年度年次大会, 九州大学(福岡県福岡市), 2016.9.12-14, J0120105.
17. 池田 徹, 井上 航太朗, 小金丸 正明, 畑尾 卓也, 中井戸 宙, パワーデバイスにおける封止樹脂と基板のはく離強度評価, MES2016, 中京大学(愛知県名古屋市), 2016.9.8-9, 2B3-2.
18. Toru Ikeda, Yuji Koga, Scalar parameter analysis of three-dimensional interfacial corner of jointed dissimilar anisotropic materials, ECCOMAS Congress 2016, Crete (Greece), June 5-10, 2016, 6851.

19. 池田 徹, 星子 純輝, 河野 務, ポアソン比を考慮した半導体実装部の粘弾性解析とデジタル画像相関法によるひずみ分布の検証, 第30回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 東京工業大学 (東京都目黒区), 2016.3.22-24, 2016, 22C2-5, pp. 104-107.
20. 柳瀬 篤志, 池田 徹, 数結晶粒よりなる微細スズ試験片の変形挙動解析, 日本機械学会九州支部第69期総会講演会講演論文集, No. 168-1, 熊本大学 (熊本県熊本市), 2016.3.15, 2016, pp. 87-88.
21. 古賀 裕二, 池田 徹, 三次元接合角部の特異性応力場解析手法の開発, 日本機械学会九州支部第69期総会講演会講演論文集, No. 168-1, 熊本大学 (熊本県熊本市), 2016.3.15, 2016, pp. 85-86.
22. 川下 隼介, 池田 徹, パワーデバイスの非線形応力解析, 日本機械学会九州支部第47回卒業研究発表講演会講演論文集, 鹿児島高等専門学校 (鹿児島県霧島市), 2016.3.4, 2016, pp. 315-316.
23. Toru Ikeda and Akiko Ozaki, Simulation of the warpage hysteresis of a layered electronic package during a thermal cycle, Bio4Apps 2015, 九州大学 (福岡県福岡市), 2015.12.9-11.
24. 古賀 裕二, 池田 徹, 三次元接合角部のスカラーパラメーター解析手法の精度改善, M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶応義塾大学 (神奈川県横浜市), 2015.11.21-23, OS0506-141.
25. 新谷 寛, 池田 徹, 広佐古 晃, 谷江 尚史, 圧縮応力場におけるはんだ接合部の変形挙動の測定, M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶応義塾大学 (神奈川県横浜市), 2015.11.21-23, GS0503-339.
26. 尾崎秋子, 池田 徹, 中井戸 宙, 畑尾 卓也, パワーデバイス用樹脂と金属基板のはく離強度評価, 日本機械学会第28回計算力学講演会, 横浜国立大学 (神奈川県横浜市), 2015.10.10-12, 012.
27. 芝 健太, 池田 徹, 中野 景介, 草間 竜一, ワイヤボンディング強度に及ぼすアルミパッドの特性評価, 日本機械学会第28回計算力学講演会, 横浜国立大学 (神奈川県横浜市), 2015.10.10-12, 011.
28. 柳瀬 篤志, 池田 徹, 荻谷 義治, 数結晶よりなるスズ微細試験片内のひずみ測定, 日本機械学会第28回計算力学講演会, 横浜国立大学 (神奈川県横浜市), 2015.10.10-12, 013.
29. 池田 徹, 柳瀬 篤志, 宮崎 則幸, 数結晶よりなる錫微小試験片の変形機構の解明, 日本機械学会2015年度年次大会, 北海道大学 (北海道札幌市), 2015.9.13-16, J0610204.
30. Toru Ikeda, Kenta Shiba, Keisuke Nakano and Ryuichi Kusama, Evaluation of the reliable material properties of Al pads that have strong delamination toughness of Au/Al wire bonding, EMAP2015, Portland (U.S.A), September 1-4.
31. Toru Ikeda, Akiko Ozaki, Takuya Hatao and Noriyuki Miyazaki, Warpage hysteresis estimation of an electronic package during a thermal cycle, InterPACK/ICNMM2015-48168, San Francisco (U.S.A), July 6-9, 2015, 2015, pp. 1-8.
32. 中井戸 宙, 畑尾 卓也, 山下 勝志, 尾崎 佑衣, 池田 徹, 尾崎 秋子, 異種材界面における高耐熱樹脂のはく離評価解析, 日本機械学会第27回計算力学講演会, 岩手大学 (岩手県盛岡市), 2014.11.22-24, 講演番号102.
33. 尾崎 秋子, 池田 徹, 畑尾 卓也, 中井戸 宙, 熱履歴による物性変化を考慮した模擬PoPパッケージの反りヒステリシス解析, 日本機械学会第27回計算力学講演会, 岩手大学 (岩手県盛岡市), 2014.11.22-24, 講演番号104.
34. 池田 徹, 尾崎 秋子, 寺元 祐貴, 宮崎 則幸, 畑尾 卓也, パワーデバイスにおける封止樹脂と基板の界面はく離強度評価, 日本機械学会第27回計算力学講演会, 岩手大学 (岩手県盛岡市), 2014.11.22-24, 講演番号103.
35. Toru Ikeda, Akiko Ozaki, Hiroshi Nakaido, Takuya Hatao and Noriyuki Miyazaki, Warpage analyses of a package on package considering the change of visco-elastic material properties of resin during thermal history, EMAP2014, Taipei (Chinese Taipei), October 22-24, 2014, pp. 229-232.
36. 池田 徹, 尾崎秋子, 寺元祐貴, 宮崎 則幸, 畑尾卓也, パワーデバイスにおける封止樹脂のはく離評価, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京電機大学 (東京都足立区), 2014.9.7-10, 2014, J0310206.
37. 池田 徹, 尾崎秋子, 畑尾卓也, 中井戸宙, 粘弾性物性の熱履歴を考慮した電子パッケージの反りヒステリシス解析, エレクトロニクス実装学会 MES2014, 大阪大学 (大阪府大阪市), 2014.9.4-5, pp. 343-346.

38. Toru Ikeda, Takashi Tokuda, Yosuke Taguchi and Noriyuki Miyazaki, Singular stress analysis of sharp three-dimensional interfacial corner of jointed dissimilar materials using H-integral, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona (Spain), 20-25 July 2014.

39. Toru Ikeda, Yosuke Taguchi and Noriyuki Miyazaki, Stress singularity analysis of three-dimensional interfacial corner of jointed dissimilar materials, Proceedings of computational engineering and science for safety and environmental problems (COMPSAFE2014), Sendai International Center (宮城県仙台市), 13-16 April 2014, pp. 638-640.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.kagoshima-u.ac.jp/~iked/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 徹 (IKEDA, Toru)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：40243894