

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360047

研究課題名（和文） 次世代耐高温 SiC パワーデバイスの高信頼性実装技術に関する研究

研究課題名（英文） A Study on education system for packaging reliability of next generation SiC power device.

研究代表者

于 強 (YU QIANG)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80242379

研究成果の概要（和文）：

次世代耐高温 SiC パワーデバイスの高信頼性実装技術を確立するために、新たに Ag ナノ接合の信頼性を評価するための試験方法と評価方法を確立した。さらに実装構造の信頼性評価を行うために実使用環境におけるモジュールの劣化などを含めたシミュレーション技術を確立した。これらの方法を用いて、次世代パワーデバイスの実用的かつ汎用的な評価方法を確立した。

研究成果の概要（英文）：

A new evaluation system for next generation SiC power device was established. The new experimental measurement method and the reliability evaluation approach have been proposed for the new Ag nano joints. And a new simulation system considering the fatigue process has been developed to assess the reliability behavior of the power modules.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：疲労・接合技術・信頼性・計算力学

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止へ向けての Co2 削減は急務であり、自動車では、ハイブリッド自動車や電機自動車などの電氣化に関する研究開発が急ピッチで進められている。これらの自動車の普及と更なる省エネルギー化のために

は、駆動システムの小型軽量化と高効率化が求められている。回転モーターの効率を制御するために使用されるパワーモジュールの耐熱性の向上と高効率化は、これらに対する寄与が大きい。これに向けた有力な技術として、パワーモジュールの Si 素子の代わりに耐

高温性が優れ、損失の低い SiC 素子の開発とその高体熱実装技術の確立が考えられる。

2. 研究の目的

電機自動車の普及には、車両駆動システムの小型化が重要であり、パワーモジュールの耐熱性の向上と高効率化はこれらに対する寄与が大きい。本研究では、耐熱性 300℃以上の SiC パワーモジュール実現のため、新コンセプトの高耐熱構造と信頼性評価技術を開発する。新技術では接合機能と熱ひずみ吸収機能を分離する新コンセプトの高耐熱性構造により、300℃を超える高耐熱化を図る。接合には、機械、電気、伝熱特性以外に、接合工程での熱応力を抑えるため接合温度が低いことが求められる。これを満たす材料として考えられる金属ナノ粒子による高信頼性接合技術とその評価技術を開発する。また、熱ひずみの吸収には、低降伏の高純度 Al 基板を用い、その熱ひずみに対する信頼性の定量評価、金属ナノ粒子による接合界面を良好にするめっきの開発を実施する。さらに、各部に発生する応力、ひずみを予測する技術、構成要素の強度・耐久性を評価する技術、劣化特性・寿命を予測する技術を開発することで、信頼性評価技術を構築する。

3. 研究の方法

本研究では耐高熱 SiC パワーモジュールの高信頼性実装接合部の構造および信頼性評価手法を確立するために Ag ナノ材料の最適な実装条件、メッキ特性を確立するために、緻密な接合層を比較的低いエネルギーで焼結するための最適なナノ粒子分布と焼結温度条件を明らかにするとともに、異種線膨張材料で構成されるせん断試験方法を用いたナノ材料接合層の特性評価手法を確立し、3 点曲げ試験法を用いたメッキ特性評価手法と合わせて接合部の信頼性評価手法を確立する。これらの手法で評価した材料の機械的特性とシミュレーション手法の導入によって

実機の接合部信頼性の確保を実現する。さらに実機の検証を行うために、-50℃~350℃の温度環境を有する温度サイクル試験機を開発し、実機の信頼性の検証を実現する。さらに、確立した技術を融合し、信頼性評価システムを構築することによって、次世代耐高温パワーモジュールの研究開発の実用化と効率化を実現する。

4. 研究成果

22年度

(1) 高耐熱パワーモジュール構造の開発をした。新コンセプトである基板回路に高い熱歪吸収機能をもたせることで接合材から熱歪吸収機能を外して300℃を超える耐熱性を持たせる構造としている。熱歪吸収機能を持たせる基板回路の材料には、他の要素の応力を低く保つために強度が低いことが求められ、熱歪吸収と耐久性の両立のために大きな延性が求められる。高純度のAlがこれの有候補として用いられた。接合材には、機械、電気、伝熱、耐熱性に併せて、接合時の耐熱性と熱応力を低く抑えるため接合温度が低いこと理想である。これの候補として、金属ナノ粒子材料を用いた。このように、新コンセプトに係わる、新開発や新規の用途となる材料の開発とその特性を明確にして、必要な信頼性を確保できるモジュール構造を開発した。

(2) 300℃高耐熱接合技術の開発をした。パワーモジュールの基板とパワー半導体チップとの完全鉛フリー接合を実現するナノサイズ金属粒子ペーストおよび接合技術を開発した。今回開発に取り組むナノサイズ金属粒子ペーストは素材的には300℃以上の耐熱性を実現できるポテンシャルを持っている。

(3) 高温温度サイクル試験装置の開発をした。次世代耐高温パワーモジュールの信頼性

評価を行うために、まず必要とされているのが-50℃～350℃の温度範囲を有する繰り返し耐久試験装置である。研究で開発した小型省エネ高速熱衝撃試験機は、高温と低温基盤台に検査対象を移動し接触させ、熱伝導によって検査対象部品の温度をコントロールし、机上で試験する機能を、従来に比して簡単・低価格・超省エネ・高速に実現できる革新的技術である。

23 年度

(1) 高温接合材料と高純度アルミ基板を用いた高耐熱パワーモジュール構造の開発を行った。これより基本的に 300℃の耐使用温度のモジュールの基本構造を確立した。

(2) ナノ技術を用いたナノ Ag 粒子の Au 粒子系の材料を用いて耐高温の接合技術を確立した。この技術を用いて従来の高温はんだ材料で実現できなかった実装構造の基盤技術を実現することができた。

(3) 300℃高密度高耐熱実装信頼性評価技術の開発を行った。耐高温実装構造の緩衝材料として超高純度 Al の疲労寿命の評価を行った。パワーモジュールの新しい複合実装構造において超高純度 Al 基板をもって実装接合部の熱応力の集中を吸収し、モジュール全体の信頼性を確保している。そのために応力集中の影響を考慮した超高純度 Al 基板の疲労強度の定量評価はパワーモジュール全体の実装信頼性の定量評価の手法およびデータベースを構築した。新しいナノ粒子の実装材料の信頼性評価を行うために、熱疲労寿命評価試験装置を開発した。平成 22 年度において開発された温度サイクル試験を用いて Ag ナノ実装接合部の温度サイクル疲労耐久試験を実施し、被接合体のメッキ材料およびメッキ条件とメッキの耐久信頼性の関係を明らかに耐高温実装構造におけるメッキ材料およびメッキ方法の確立をした。

24 年度

(1) 300℃高密度高耐熱実装信頼性評価技術の開発を行った。

高耐熱パワーモジュールを実現するためには、新たなコンセプトの高耐熱構造が必要であり、超高純度 Al 基板と Ag ナノペストなどの実装材料で組み合わせた複合実装構造を検討している。この新たなコンセプトの高耐熱構造に対応した信頼性評価技術の確立は製品化において不可欠のものである。プロジェクトでは以下の研究を実施することによっての実用的な信頼性評価技術を確立し、高性能・高信頼性のパワーモジュールの製品開発を支援する技術を開発した。

①超高純度 Al の疲労寿命の評価を行う。パワーモジュールの新しい複合実装構造において超高純度 Al 基板をもって実装接合部の熱応力の集中を吸収し、モジュール全体の信頼性を確保している。そのために応力集中の影響を考慮した超高純度 Al 基板の疲労強度の定量評価はパワーモジュール全体の実装信頼性の定量評価において大変重要な課題である。本研究は新たに開発した試験方法を用いて、超高純度の Al の基板応力集中部の疲労寿命を計測した。

②Ag ナノペストなどの新しい実装材料の材料特性および信頼性評価術を確立する。新しい実装構造のための適切な実装材料の効率的な選定は実用化において大変重要な課題である。基板材料と実装材料の適切なバランスを制御することはモジュール全体の高い信頼性を実現するための不可欠な技術である。

(2) パワーモジュールの製品化のための効率的な信頼性技術を開発する。(于、白鳥) パワーモジュールの性能は電気特性・熱制御特性・構造特性などによって支配されているため、このような諸特性を適切に考慮できる

信頼性支援技術が重要である。また、実装信頼性に対して実装プロセスにおいて発生する誤差などのばらつきは大きな影響を及ぼすため、そのメカニズムを解明した。本研究では電気・熱・構造の連成問題を考慮できる信頼性シミュレーションシステム、および実装プロセス解析システムを構築することによって高信頼性のパワーモジュールの製品化を支援することができるようにした。研究代表者および分担者はこれまでに電子部品のはんだ接合部の信頼性評価を実施するために、シミュレーション技術を用いた研究開発を行ってきた。これらの研究成果は既に実用化されているものもある。これまでに蓄積してきたこれらの研究成果を新しい実装構造に適用することによって短期間で上記目標が達成することができた。

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 2 件)

- ① Takayoshi Katahira, Masato, Fujita, Qiang Yu, PWB Micro-Structural Influences over Drop Reliability in Mobile Devices, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol. 4, 24-28, 2010
- ② Takashi Anzawa, Qiang Yu, Masanori Yamagiwa Tadahiro Shibutani, Masaki Shiratori, Reliability Evaluation on Deterioration of Power Device Using Coupled Electrical-Thermal-Mechanical Analysis, Journal of Electronic Packaging(ASME JEP), 1 32, Iss. 3 Selected Paper(ThETA2), 査読有, 2010

[学会発表] (計 18 件)

- ① Tomohiko Takeda, Qiang Yu, Hiroyuki Sato, Measurement Methods for Curing Properties of Resin Considering Process Condition, Itherm2012, 2012, San Diego(USA)
- ② Satoru Okuyama, Qiang Yu, Ttakahiro Akutsu, Reliable Evaluation Method for Solder Joints in Vehicle Electronics Devices Considering the Actual Use

- Conditions, Itherm2012, 2012, SanDiego(USA)
- ③ Yasutaka Yamada, Qiang Yu, Tomohiro, Takahashi, Yusuke Takagi, Study on Thermal Design due to Downsizing of Power Module Using Coupled Electrical-Thermal-Mechanical Analysis, EMAP2012, 2012, HongKong(China)
- ④ Akihiro Higuchi, Qiang Yu, Toshikazu Oshidari, Mingliang Cui, A Study on Evaluation Method of new Packaging Structure for High-Temperature Power Device, EMAP2012, 2012, HongKong(China)
- ⑤ Kunihiro Takenaka, Qiang Yu, Investigation of Thermal Fatigue Life Scatter of IVH in PWB, Itherm2012, 2012, San Diego(USA)
- ⑥ T. Akutsu, Q. Yu, Effect of crystal grain size on fatigue characteristics of lead free solder joints, Proc. of New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, 2012, Ostrava(Czech)
- ⑦ T. Takahashi, Q. Yu, Precision Evaluation for Thermal Fatigue Life in Power Cycling Using Coupled Electrical-Thermal-Structural Analysis, Proc. of New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, 2012, Ostrava(Czech)
- ⑧ A. Hirose, Q Yu, T. Ishikawa, A Study on the Thermal Fatigue Evaluation of Ni Plating in SiC, Proc. of New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, 2012, Ostrava(Czech)
- ⑨ Y. Yoshida, Q. Yu, Evaluation of Thermal Deformation of the Sealing Resin Considering the Effect of Curing Process on Mechanical Property, Proc. of New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, 2012, Ostrava(Czech)
- ⑩ M. Cui, T. Oshidari, Q. Yu, A Study on Reliability of Nano-Metal Pastes in High Temperature Resistant of Power Devices, Proc. of New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, 2012, Ostrava(Czech)
- ⑪ Yuji Nishimura, Qiang Yu, Reliability Evaluation of Fatigue Life for Solder Joints in Chip Components Considering Dispersion of the Shape and the Properties, InterPACK2011, 2011, San Francisco(USA)
- ⑫ Sato Hiroyuki, Qiang Yu, Sone,

Ryusuke, A Study on the Thermal Deformation and the Mechanical Properties due to Curing Process Of the Encapsulation Resin, InterPACK2011, 2011, San Francisco(USA)

- ⑬ Takayuki Ishikawa, Qiang Yu, Toshikazu Oshidari, Hiromi Sugihara, A Study on Reliability of High-Temperature Joint in Packaging Structure, InterPACK2011, 2011, San Francisco(USA)
- ⑭ Liu Shilin, Qiang Yu, Michael Pecht, Reliability Evaluation of Electronic Devices Under Considering the Actual Use Conditions, InterPACK2011, 2011, San Francisco(USA)
- ⑮ Tomohiro Takahashi, Qiang Yu, Masahiro Kobayashi, Precision Evaluation for Thermal Fatigue Life of Power Module Using Coupled Electrical-Thermal-Structural Analysis, InterPACK2011, 2011, San Francisco(USA)
- ⑯ Takahiro Akutsu, Qiang Yu, Effect of Micro Structure on Fatigue Characteristics of Lead Free Solder Joints, InterPACK2011, 2011, San Francisco(USA)
- ⑰ Tomohiko Takeda, Qiang Yu, Measurement Methods for Curing Properties of Resin Considering Process Condition and Effects on Package, EPTC2011, 2011, Singapore
- ⑱ M. Kobayashi, Q. Yu, Reliability Evaluation for Specifying Fatigue Mode in Power Device, THERMINIC2010, 2010, Macao

〔図書〕(計1件)

于強、山際正憲、安澤貴志、パワーデバイスの実装技術の研究動向、株式会社エヌ・ティー・エス、2010、277-302

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称：小型熱衝撃試験機

発明者：于強、臼井重徳、篠原俊朗、八坂慎一、篠原主勲

権利者：共有

種類：特許

番号：2010-169206

出願年月日：2010年7月28日

国内外の別：国内

名称：熱疲労寿命検知センサー

発明者：于強、高木寛二

権利者：共有

種類：特許

番号：特願 2011-281467

出願年月日：2011年12月22日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

于強 (Yu Qiang)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：80242379

(2) 研究分担者

澁谷 忠弘 (Shibutani Tadahiro)

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号：10332644

白鳥 正樹 (Shiratori Masaki)

横浜国立大学・安心・安全の科学教育センター・特任教授

研究者番号：60017986