

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560873

研究課題名(和文) 高温動作パワー半導体実装用アルミ銅合金ワイヤボンディングプロセスの開発

研究課題名(英文) Development of high-temperature operation power semiconductor for the aluminum copper alloy wire bonding

研究代表者

田代 優 (TASHIRO, SUGURU)

茨城大学・工学部・講師

研究者番号：90272111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化問題対応へのソリューションの一つである、電気自動車等の環境対応車の重要技術であるインバーターの高信頼化、大容量化、小型化に不可欠なその構成要素である絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)モジュールの高性能化・高信頼性化には電極間の接合が重要である。電極間の接合にはアルミワイヤが用いられ、そのワイヤの高性能化と高信頼性化が重要である。本研究では、高温動作次世代パワー半導体実装用新アルミ銅合金ワイヤの開発を行い、アルミへの銅添加量と時効処理条件の関係とワイヤ組織中の析出相の関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Which is one of the solutions to the corresponding global warming problem, reliability of an important technology of environment-friendly vehicles such as electric cars inverter, large capacity, insulated gate bi-Polar is an essential component thereof to downsizing the high performance and high reliability of the transistor (IGBT) module junction between the electrodes is important. The junction between the electrodes the aluminum wire is used, performance and reliability of the wire is critical. In this study, we developed a new aluminum copper alloy wire for high-temperature next-generation power semiconductor packaging, was to clarify the relationship of the copper added amount and the aging treatment conditions of the relationship and the wire tissue of the precipitation phase of the aluminum.

研究分野：接合

キーワード：アルミ銅合金ワイヤ 相 析出 時効処理

1. 研究開始当初の背景

CO₂等の温室効果ガスによる地球温暖化をはじめとする環境問題および化石燃料の枯渇が国際的に大きな問題となっている。この発生源のひとつである自動車は、駆動方法を内燃機関から環境対応ハイブリッド車、そして電気自動車へと変換して、その排出量の削減に取り組んでいる。一方、電動化によって自動車で消費される電力は増加の一途をたどっており、インバータは次世代の自動車の心臓部であるといえる。現状のインバータにおいては、パワー半導体と外部回路の接続に用いられるアルミワイヤボンディング部の高温信頼性と稼動時の排熱方法の二点に問題がある。一つ目の問題点は、インバータの核心部

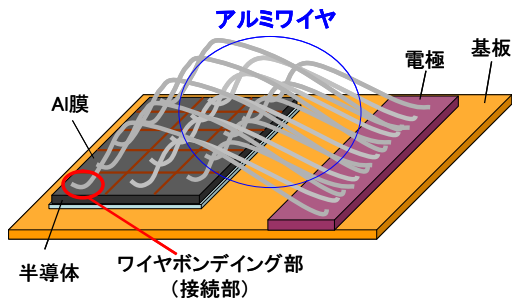


図1 IGBT模式図

である IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュール上のアルミ電極と外部回路の接続に用いられているアルミワイヤボンディング部で発生する。（図1参照）。

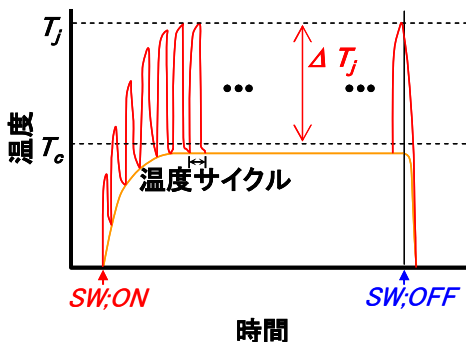


図2 IGBT稼動時の温度と時間の関係

T_c : 半導体温度
 T_j : ワイヤボンディング接続部温度

この接合部では、インバータ稼動時に図2に

示すような ΔT_j に対応する急激な温度サイクルが負荷される。その結果、純アルミワイヤと半導体（Si）の接合部において熱膨張係数のミスマッチ（Si: $3.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、Al: $25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）により、図3に示すような熱応力が繰り返し負荷される。

| | 加熱過程（電流オン） | 冷却過程（電流オフ） |
|------------------|-----------------------|------------------------|
| ワイヤボンディング部両端部の応力 | <p>圧縮応力 Alワイヤ</p> | <p>引張り応力 Alワイヤ</p> |
| クラック | 伝播なし | 伝播あり |

図3 加熱冷却過程におけるワイヤの変形挙動

特に温度降下時の引張り応力によってクラックが発生・進展し、最終的に剥離するという深刻な問題である。また、二つ目の問題点はインバータには、パワー半導体の熱暴走防ぐためにヒートパイプを用いた水冷システムが用いられている。このために、インバータは大型・複雑化し、自動車の軽量化による燃費向上の障害となっている。したがって、この接合部の高温信頼性を大幅に改善できる実装技術を開発できれば、約 200°Cとされている現状の Si パワー半導体の使用上限付近まで動作温度を上げることが可能となる。その結果、インバータを現状の水冷方式から空冷方式に変換出来る可能性があり、インバータの小型・軽量化によって、燃費の向上や低コスト化が期待出来、環境問題に対応できると考えられる。このような新しいワイヤワイヤボンディング技術を早急に構築する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高信頼性を有する高温動作次世代パワー半導体実装用新アルミ銅合金ワイヤボンディング技術の開発である。申請

者らは、これまでの予備試験の結果、(I) 従来のアルミワイヤ接合部の詳細な観察から接合部のワイヤ側でクラックが発生・伝播すること、(II) アルミワイヤの結晶粒界および結晶粒内に θ 相 (Al_2Cu : 金属間化合物) を析出させることによって結晶粒界で発生・伝播するクラックのピン止め効果による進展の抑制が出来ること、(III) 接合部に温度サイクルのみを負荷することで、通電サイクル試験と同様に高速度で信頼性の評価を出来ることを見出した。

本研究は、高信頼性を有する高温動作次世代パワー半導体実装用新アルミ銅合金ワイヤボンディング技術の開発を行う。これまでに得た知見(II)をもとに、ワイヤ中の θ 相の析出量と析出状態の制御を目的として、アルミに加える銅の添加量と時効条件の最適化を行う。この結果をもとに析出相である θ 相の最適析出組成・時効条件を用いて、①最適銅添加量で作製し、溶体化処理した新アルミ銅合金ワイヤを用いてワイヤボンディングを行い、②①で前年度に得た時効処理条件下でアルミワイヤボンディング部の θ 相の析出制御を行い、③②の信頼性評価をヒートサイクル試験によって行い、新しいボンディング技術の開発を行う。最終的には、作製した新アルミ銅合金ワイヤボンディングを適用した高信頼性を有する新しい実装技術の構築を行い、Siパワー半導体の高温化やSiC半導体への適用と展開をめざす。

3. 研究の方法

ワイヤボンディング接合部の剥離はワイヤと半導体の熱膨張率のミスマッチに起因し、両者の温度差による引張りと圧縮の繰り返し応力によって発生・進展することを申請者らが世界で初めて明らかにした。また、接合部の詳細な観察の結果、クラックが発生・伝播するワイヤ側の結晶粒界および結晶粒内に θ

相のような金属間化合物を析出させることにより、結晶粒界で発生・伝播するクラックをピン止め効果により高温強度の上昇が期待出来ると着想した。予備試験の結果、 θ 相が析出する組成条件下では市販のAl-50ppmNiワイヤと比べ、せん断強度に有意な差があることを確認している。しかし、直径 $300\mu m$ 程度のアルミ銅合金ワイヤ中の θ 相の析出量や析出状態は、系統的な評価が行われていない。そこで鋼中の析出物量を電気的に見積もる方法をAl-0.5wt.%ワイヤに応用することを着想し、ワイヤの電気抵抗を液体窒素温度で測定を行い、析出量の変化を見積もることが出来ることを確認した。アルミ中に θ 相が析出することによってワイヤの抵抗率が低下し、時間とともに θ 相が析出し、300minで最大析出量となり、その後は飽和することが分かる。したがって、アルミ銅ワイヤ中の銅添加量、時効処理条件と θ 相の析出量および析出状態は、実装プロセスの信頼性に非常に重要な情報を与えることが予測される。平成25年度は、前年度得た θ 相の最適析出組成・時効条件を用いて、①最適銅添加量で作製し、溶体化処理した状態の新アルミ銅合金ワイヤを用いてワイヤボンディングした後、②実装したワイヤを接合状態で前年度に得た時効処理条件下で θ 相の析出制御を行うという、これまでに例のないユニークな手法を用いた新しいボンディング技術の開発を実施する。本研究で開発する新しいボンディング技術では、溶体化処理したアルミ銅合金ワイヤをパワー半導体に接合した状態で時効処理を行い、高信頼性を得るための最適な θ 相の析出制御を行う。尚、このとき前年度に得た新アルミ銅合金ワイヤでのアルミ中の銅の添加量や最適時効条件と実際にボンディングした状態での θ 相の析出挙動が同様であることをSEM/EDX、EBSDやTEM・EDX等を用いて評価・確認

する。この結果をもとに析出量および析出状態の最適化を実施する。次に析出量および析出状態を最適化した後、ヒートサイクル試験により信頼性を評価し、高信頼性の新しい実装技術を構築する。

4. 研究成果

- (1) 銅添加量の異なる直径 $300\ \mu\text{m}$ アルミ銅合金ワイヤボンディング用ワイヤとして Al-3.04wt.%Cu ($\phi 0.3\text{mm} \times 50\text{m} \times 1$ 本) および Al-0.22wt.%Cu ($\phi 0.3\text{mm} \times 50\text{m} \times 1$ 本) それぞれ作製した。
- (2) 作製した銅添加量の異なる各ワイヤを溶体化処理 ($500^\circ\text{C} \times 30\text{min}$: Ar+4%H₂ 気流中) を行い、銅をアルミ中に固溶させた。

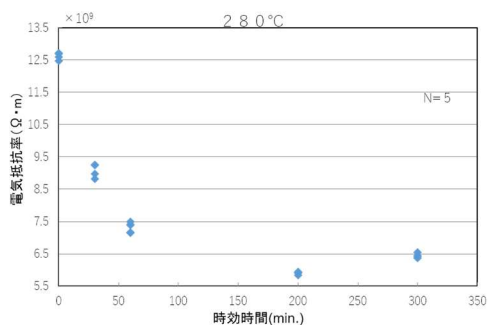


図4 280°Cにおける時効時間と電気抵抗率の関係 (Al-3.04wt.%Cuアルミ銅合金ワイヤ)

- (3) 溶体化処理したワイヤを IGBT 作製プロセスで制限される温度 (高温はんだ融点・半導体 動作保証温度等) 等を考慮した時効処理温度 ($280^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ (SiC 半導体使用時を想定)) で Al-3.04wt.%Cu アルミ銅合金ワイヤの時効曲線の時効曲線を作成した。一例を図 4 に示す。この結果から、予備実験で作成した Al-0.5wt.%Cu アルミ銅合金ワイヤの同様に、アルミ中に析出物相が出現することによってワイヤの抵抗率が低下し、時間とともに析出物の生成量が飽和することが分かった。アルミ銅ワイヤ中の銅添加量、時効処理条件と θ 相の析出量の関係は、

実装プロセスの信頼性に非常に重要な情報を与えることが考えられる。また、Al-3.04wt.%Cu アルミ銅合金ワイヤについては、ビッカース硬度が 88Hv とかなり硬く接合時に半導体チップにダメージを与える可能性が大きいという知見が得られた。

- (4) Al-0.22wt.%Cu アルミ銅合金ワイヤについても、IGBT 作製プロセスで制限される温度 (高温はんだ融点、半導体 動作保証温度等) 等を考慮した時効処理温度 ($280, 300, 320$ および 350°C (SiC 半導体使用時を想定)) における時効曲線の作成を実施・完了した。この結果から、予備実験で作成した Al-0.5wt.%Cu アルミ銅合金ワイヤの同様に、アルミ中に析出物相が出現することによってワイヤの抵抗率が低下し、時間とともに析出物の生成量が飽和することが分かった。
- (5) Cu 添加量を変えて作製したワイヤについて、溶体化処理条件および最大時効処理条件下における組織観察を SEM/EDX および TEM を用いて行った。その結果、得られた知見を以下に挙げる。
 - ① Al-3.04wt.%Cu アルミ銅合金ワイヤについて θ 相が最大析出時効する条件を決定し、工業的に重要と考えられる溶体化処理したワイヤおよび 280°C 下の時効処理を施したワイヤの組織観察を行った結果、溶体化処理によって Cu が Al 母相に完全に固溶し、過飽和固溶体となり、図 5 に示すように $280^\circ\text{C} \times 200\text{min}$ で時効処理をしたワイヤでは、結晶粒界に θ 相が析出し、結晶粒内には θ' 相が網目状に析出することを見出した。また、
 - ② Al-0.22wt.%Cu アルミ銅合金ワイヤについて θ 相が最大析出時効する条件を決定し、溶体化処理したワイヤおよび 280°C 下の

時効処理を施したワイヤの組織観察を行った結果、図6に示すように結晶粒界および結晶粒内に θ 相は観察されなかった。しかし、このワイヤの硬度は、36Hvと市販の純アルミワイヤ(23Hv)に比べて大きく、アルミ結晶中に固溶しているCuの影響によって、Al-0.5wt.%Cuアルミ銅合金ワイヤの硬度33Hvに近い値を示すことが分かった。これらの結果から、③アルミ中のCu添加量を変えることでワイヤ組織の制御が可能であることを確認した。これらの研究成果によるアルミ銅合金ワイヤのCu添加量と θ 相の析出時効条件および析出挙動の解明は、これからのIGBT実装プロセスの信頼性に重要な情報を提供できると信じる。

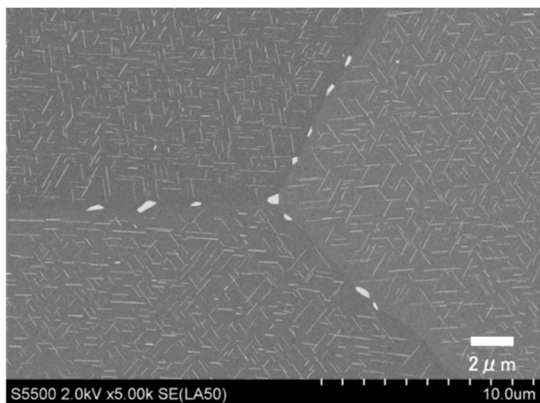


図5 Al-3.04wt.%Cuアルミ銅合金ワイヤの断面SEM像

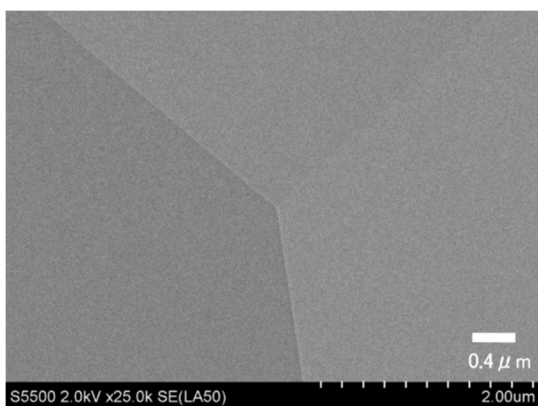


図6 Al-0.22wt.%Cuアルミ銅合金ワイヤの断面SEM像

(6) 設計・作製を計画していた高速ヒートサイクル試験機は、設計および作製が完了し、その運転性能試験の結果、設計仕様どおりの性能を有することを確認した。

(7) 一方、アルミ銅合金ワイヤボンディング用ワイヤの接合後の高温ヒートサイクル試験による信頼性の評価については、超音波ボンダーの老朽化による装置トラブルのため、IGBT模擬基板へのアルミ銅合金ワイヤの接合が定常的にできず、以後の評価試験を含めて実施期間中に終わることが出来なかった。

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 0件)

[学会発表] (計 0件)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

[その他]

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田代 優 (TASHIRO SUGURU)

茨城大学・工学部・講師

研究者番号：90272111

(2) 研究分担者

大貫 仁 (ONUKI JIN)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：70315612

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

無し