

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

Shunsuke Kanetsuki

氏名 金築 俊介
学位の種類 博士 (工学)
学位記番号 博 甲 第 60 号
学位授与 平成 31 年 3 月 23 日
学位授与条件 学位規定第 3 条第 3 項該当
論文題目 Al/Ni 瞬間はんだ接合体の低熱抵抗化に関する研究
論文審査委員 (主査) 教授 生津 資大¹
(審査委員) 教授 榎田 玄一郎¹ 教授 高木 誠¹ 客員教授 佐藤 一雄¹
教授 三宅 修吾²

論文内容の要旨

Al/Ni 瞬間はんだ接合体の低熱抵抗化に関する研究

近年、自動車分野を中心に、パワーエレクトロニクスは高効率で省エネルギーな技術として注目を集めている。車載用パワーデバイスの発熱密度は増加の一途を辿っており、特に次世代 SiC パワーデバイスの性能を最大限に引き出し、高機能かつ高効率なパワーモジュールの実用化を目指す上で、デバイスパッケージの低熱抵抗化やデバイス実装材料の高耐熱化等、デバイスダイボンディング技術の高度化が強く求められている。

一方、軽金属と遷移金属をナノの厚みで積層堆積させた金属多層膜は、外部からの刺激印加により化合物を生成して発熱する現象を示す。金属の組み合わせとしては Al/Ni、Ti/Si、Al/Ti 等が挙げられ、最も代表的なものは Al/Ni である。2000 年頃から Al と Ni のシートを積層圧延する工程を繰り返して Al/Ni 多層フォイルを作製し、合金化する研究がなされてきた。最近では、スパッタリング等でこれらを積層堆積させて多層膜を作り、発熱性能が金属の組み合わせや原子比、膜厚等で制御できることが確認されている。Al/Ni 多層膜にスパーク等の外部刺激を与えると NiAl 合金を形成し、発熱する。局所的に生じた熱が周囲の反応を誘起するエネルギーとして使われるため、発熱反応が膜内を自己伝播する。伝播速度は約 10m/s と高速で、到達温度は例えばバイレイヤー (Al と Ni が一層ずつ) 100nm、総膜厚 40 μ m の Al/Ni 多層膜では刺激印加から 0.1

秒後に約 1000°C に到達する。この瞬間かつ局所的な発熱特性を示す“Al/Ni 自己伝播発熱多層膜”は、はんだ溶融熱源として利用できる。Al/Ni 瞬間はんだ接合は、近年注目されている焼結接合等と比べて貴金属フリーであり、短時間接合が可能な新たな耐熱実装技術として期待される。自己伝播発熱 Al/Ni ナノ多層膜を SiC パワーデバイスのためのダイボンディングの熱源として応用できれば、接合プロセス工程の低コストかつ省エネ化が実現するとともに、ゼロエミッション技術のためにプロセス全体として低 CO2 排出化も期待でき、地球環境問題にも貢献できる可能性がある。

本研究では、Al/Ni 自己伝播発熱多層膜を用いた瞬間はんだ接合体の作製技術の確立と、パワーデバイス応用を目指した接合部の低熱抵抗化を目標に掲げている。本論文は、これらに関連する数々の独自接合技術の構築に挑戦し、得られた研究成果をまとめたものであり、全 7 章で構成される。

第 1 章は序論であり、自動車業界の現状と今後の展望を述べるとともに、これからの自動車に不可欠な SiC パワーモジュールに求められる性能と技術課題を説明している。そして、Al/Ni 自己伝播発熱多層膜を用いた瞬間はんだ接合技術の有用性と可能性に言及している。

第 2 章では、Al/Ni 発熱多層膜を用いた瞬間はんだ接合体の製作方法を論述している。まず、Al/Ni 系自己伝播発熱多層膜の基本特性を説明し、瞬間ダイボンディングに有用な多層膜作製条件を述べている。次いで、Al/Ni 多層膜

1 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

2 神戸市立工業高等専門学校 (神戸市)

を用いて SnAg はんだを Si 基板に瞬間接合し、得られた接合サンプルの熱物性評価と接合状態評価を行っている。これらの実験結果に基づき、接合部の熱的信頼性を向上させるためには、接合圧力の効果や Al/Ni-はんだ界面の密着性制御、Al/Ni 多層膜の応力制御が、ポイド低減、すなわち、熱抵抗の低減に有用であることについて言及している。

第 3 章では、瞬間はんだ接合条件の重要な制御パラメータである接合圧力に着目し、圧力とはんだ接合部の熱抵抗との関係について実験的に検討している。一般的なはんだリフローでは加圧することなくセルフアライメントで素子のはんだ上に設置されることを利用しているが、Al/Ni 瞬間はんだ接合技術では発熱反応の持続時間が 1 秒程度と極めて短いため、この短時間内に効率よくはんだを溶解させるためには接合チップ上から面外方向に加圧する必要がある。接合時の加圧力を高めることで反応時の熱量をより多くはんだに伝えることができることを実験的に確認し、その結果、接合後の NiAl とはんだとの界面のポイド生成を抑制できることを明らかにした。そして、EPMA を用いて接合部の熱影響箇所の特徴と界面ポイド生成のメカニズムを考察し、新規接合面側はより多くの熱量をはんだに伝えることができたことを見出すことに成功している。

第 4 章では、更なる熱抵抗低減に向けて SnAg はんだと Al/Ni 多層膜の金属学的相性に着目し、Al/Ni 多層膜の成膜順序や多層膜最外層の厚さを積極的に制御してポイド生成量の違いとそれに基づく熱抵抗値の違いを実験的に調べている。接合体の NiAl とはんだとの界面、とりわけ Al/Ni をスパッタ成膜した側の界面に多くのポイドが生成されていることを確認し、このポイドが接合部全体の熱抵抗に大きく影響していることを見出した。Al/Ni 多層膜の最外層（最上部と最下部の層）を Sn と相性の良い Ni をサブミクロンの厚みで配置すると、接合時の昇温過程において Ni がはんだ内部へ積極的に拡散し、短時間で NiAl-はんだ界面に NiSn 金属間化合物 (IMC) が形成されていた。この IMC 形成が NiAl とはんだとの界面のポイドを抑制する効果をもたらしたことを実験的に見出すことに成功している。Ni 最外層の厚膜化は、結果として接合時の加圧力が小さい状態においても接合界面のポイドが減らすことができ、接合部の低熱抵抗化が実現したことを述べている。

第 5 章では、Al/Ni 多層膜を意図的に自立させ、2 枚のはんだ膜付き Si チップ間に挟み込む方法ではんだ接合体を作製し、低熱抵抗化を目指している。従来の基板上に成膜した Al/Ni 多層膜を用いた場合と比べ、NiAl 内部のクラックおよび接合界面のポイドが大幅に減少しており、低熱抵抗化の実現に成功している。Al/Ni 多層膜の自立化は、接合時の熱伝導効率よりも多層膜の機械的拘束力を緩和する効果があることを接合部の応力バランスモデルに基

づいて考察し、ポイドのみならずクラック生成を抑制する作用があることを見出している。

第 6 章では、第 4 章～6 章で作製した接合体を機械的にカットして接合部を持つロッド状試験片を作り、その機械的強度を実測している。接合界面にポイドの少ない接合体は高強度であることを確認し、低熱抵抗を示す接合体は機械的信頼性も高いことを独自の強度試験技術を駆使して明らかにしている。

第 7 章は上述の研究成果を総括している。

本論文では Al/Ni 瞬間はんだ接合体の低熱抵抗化のための新たな技術的取り組みに挑戦し、ポイド低減と低熱抵抗化ならびに高機械信頼性化を実現した。今後、ろう材等、はんだ材よりも高融点で耐熱性に優れた接合材に対して当該技術が適用できれば、さらに信頼性の高い耐熱実装技術へと繋がり、省エネルギーで高効率なパワーエレクトロニクス技術の実現が期待される。

論文審査の結果の要旨

近年、自動車分野を中心に、パワーエレクトロニクスは高効率で省エネルギーな技術として注目を集めている。車載用パワーデバイスの発熱密度は増加の一途を辿っており、特に次世代 SiC パワーデバイスの性能を最大限に引き出し、高機能かつ高効率なパワーモジュールの実用化を目指す上で、デバイスパッケージの低熱抵抗化やデバイス実装材料の高耐熱化等、デバイスダイボンディング技術の高度化が強く求められている。

一方、軽金属と遷移金属をナノの厚みで積層堆積させた金属多層膜は、外部からの刺激印加により化合物を生成して発熱する現象を示す。金属の組み合わせとしては Al/Ni、Ti/Si、Al/Ti 等が挙げられ、最も代表的なものは Al/Ni である。2000 年頃から Al と Ni のシートを積層圧延する工程を繰り返して Al/Ni 多層フォイルを作製し、合金化する研究がなされてきた。最近では、スパッタリング等でこれらを積層堆積させて多層膜を作り、発熱性能が金属の組み合わせや原子比、膜厚等で制御できることが確認されている。Al/Ni 多層膜にスパーク等の外部刺激を与えると NiAl 合金を形成し、発熱する。局所的に生じた熱が周囲の反応を誘起するエネルギーとして使われるため、発熱反応が膜内を自己伝播する。伝播速度は約 10m/s と高速で、到達温度は例えばバイレイヤー (Al と Ni が一層ずつ) 100nm、総膜厚 40 μ m の Al/Ni 多層膜では刺激印加から 0.1 秒後に約 1000°C に到達する。この瞬間かつ局所的な発熱特性を示す“Al/Ni 自己伝播発熱多層膜”は、はんだ熔融熱源として利用できる。Al/Ni 瞬間はんだ接合は、近年注目されている焼結接合等と比べて貴金属フリーであり、短時間接合が可能な新たな耐熱実装技術として期待される。

自己伝播発熱Al/Ni ナノ多層膜をSiCパワーデバイスのためのダイボンディングの熱源として応用できれば、接合プロセス工程の低コストかつ省エネ化が実現するとともに、ゼロエミッション技術のためにプロセス全体として低CO2排出化も期待でき、地球環境問題にも貢献できる可能性がある。

本研究では、Al/Ni 自己伝播発熱多層膜を用いた瞬間はんだ接合体の作製技術の確立と、パワーデバイス応用を目指した接合部の低熱抵抗化を目標に掲げている。本論文は、これらに関連する数々の独自接合技術の構築に挑戦し、得られた研究成果をまとめたものであり、全7章で構成される。

第1章は序論であり、自動車業界の現状と今後の展望を述べるとともに、これからの自動車に不可欠なSiCパワーモジュールに求められる性能と技術課題を説明している。そして、Al/Ni 自己伝播発熱多層膜を用いた瞬間はんだ接合技術の有用性と可能性に言及している。

第2章では、Al/Ni 発熱多層膜を用いた瞬間はんだ接合体の製作方法を論述している。まず、Al/Ni 系自己伝播発熱多層膜の基本特性を説明し、瞬間ダイボンディングに有用な多層膜作製条件を述べている。次いで、Al/Ni 多層膜を用いてSnAg はんだをSi 基板上に瞬間接合し、得られた接合サンプルの熱物性評価と接合状態評価を行っている。これらの実験結果に基づき、接合部の熱的信頼性を向上させるためには、接合圧力の効果やAl/Ni-はんだ界面の密着性制御、Al/Ni 多層膜の応力制御が、ポイド低減、すなわち、熱抵抗の低減に有用であることについて言及している。

第3章では、瞬間はんだ接合条件の重要な制御パラメータである接合圧力に着目し、圧力とはんだ接合部の熱抵抗との関係について実験的に検討している。一般的なはんだリフローでは加圧することなくセルフアライメントで素子をはんだ上に設置されることを利用しているが、Al/Ni 瞬間はんだ接合技術では発熱反応の持続時間が1秒程度と極めて短いため、この短時間内に効率よくはんだを溶解させるためには接合チップ上から面外方向に加圧する必要がある。接合時の加圧力を高めることで反応時の熱量をより多くはんだに伝えることができることを実験的に確認し、その結果、接合後のNiAl とはんだとの界面のポイド生成を抑制できることを明らかにした。そして、EPMAを用いて接合部の熱影響箇所の特徴と界面ポイド生成のメカニズムを考察し、新規接合面側はより多くの熱量をはんだに伝えることができたことを見出したことは工学的に意義あるものであり、評価できる。

第4章では、更なる熱抵抗低減に向けてSnAg はんだとAl/Ni 多層膜の金属学的相性に着目し、Al/Ni 多層膜の成膜順序や多層膜最外層の厚さを積極的に制御してポイド生成量の違いとそれに基づく熱抵抗値の違いを実験的に調べている。接合体のNiAl とはんだとの界面、とりわけ

Al/Ni をスパッタ成膜した側の界面に多くのポイドが生成されていることを確認し、このポイドが接合部全体の熱抵抗に大きく影響していることを見出した。Al/Ni 多層膜の最外層（最上部と最下部の層）をSn と相性の良いNi をサブミクロンの厚みで配置すると、接合時の昇温過程においてNi はんだ内部へ積極的に拡散し、短時間でNiAl-はんだ界面にNiSn 金属間化合物(IMC)が形成されていた。このIMC形成がNiAl とはんだとの界面のポイドを抑制する効果をもたらしたことを実験的に見出すことに成功している。Ni 最外層の厚膜化は、結果として接合時の加圧力が小さい状態においても接合界面のポイドが減らすことができ、接合部の低熱抵抗化を実現できたことは、将来の実用化に向けて十分意義のある実験成果であり、高く評価できる。

第5章では、Al/Ni 多層膜を意図的に自立させ、2枚のはんだ膜付きSi チップ間に挟み込む方法ではんだ接合体を作製し、低熱抵抗化を目指している。従来の基板上に成膜したAl/Ni 多層膜を用いた場合と比べ、NiAl 内部のクラックおよび接合界面のポイドが大幅に減少しており、低熱抵抗化の実現に成功している。Al/Ni 多層膜の自立化は、接合時の熱伝導効率よりも多層膜の機械的拘束力を緩和する効果があることを接合部の応力バランスモデルに基づいて考察し、ポイドのみならずクラック生成を抑制する作用があることを見出している。

第6章では、第4章～6章で作製した接合体を機械的にカットして接合部を持つロッド状試験片を作り、その機械的強度を実測している。接合界面にポイドの少ない接合体は高強度であることを確認し、低熱抵抗を示す接合体は機械的信頼性も高いことを独自の強度試験技術を駆使して明らかにしている。

第7章は上述の研究成果を総括している。本論文ではAl/Ni 瞬間はんだ接合体の低熱抵抗化のための新たな技術的取り組みに挑戦し、ポイド低減と低熱抵抗化ならびに高機械信頼性化を見事に実現している。今後、ろう材等、はんだ材よりも高融点で耐熱性に優れた接合材に対して当該技術が適用できれば、さらに信頼性の高い耐熱実装技術へと繋がり、省エネルギーで高効率なパワーエレクトロニクス技術の実現が期待される。

以上の諸点より、金築氏の博士論文は学術的にも産業的にも十分に価値のあるものであり、博士(工学)の学位授与に値するものと判定する。