

# 博士論文審査結果報告書

## 論文題目

ニッケルを接合基材とした高耐熱・熱応力緩和型  
パワー半導体デバイス実装技術の研究

申請者

小柴 佳子

情報生産システム工学専攻

2023年 10月

パワーエレクトロニクスはエネルギーの効率的な利用を担う重要な技術分野である。なかでもパワー半導体モジュールは電力変換・制御を行うキーデバイスであり、産業機器、電鉄車両、電気自動車などに用いられている。半導体素子には従来はSi（シリコン）が用いられてきたが、材料限界近くまで性能が向上しており、カーボンニュートラル社会の実現に向けてデバイスの更なる高性能化・高効率化が望まれている。近年Siに比べて高い耐電圧、電子飽和速度、熱伝導性など、優れた物性を有するワイドバンドギャップ半導体であるSiC（シリコンカーバイド）を適用したデバイス開発・実用化が進められており、より持続可能なエネルギーシステムの構築に寄与することが期待されている。SiCはSiに対して高耐圧化が可能であり、また高耐熱性のため高温動作化が可能である。このため冷却系の簡素化によってデバイス全体として小型化、省資源化という大きなメリットが見込まれる。Siデバイスの動作温度が180℃程度以下であったのに対して、自動車分野に適用されるSiCデバイスでは250℃程度での動作が期待されている。しかしながら、従来のパワーデバイスにおいて半導体素子のCu（銅）基板への接合（実装）は、材料融点200℃程度のSn-Ag-Cu（すず・銀・銅）系のはんだ材料が用いられ、SiCデバイスに期待される高温動作温度には適用できないことから、高耐熱性の実装技術・実装材料が求められている。また、高温でのデバイスの使用は、耐熱性のみならず、パワーデバイスの構成材料の熱膨張差に起因する熱応力の課題への対応が必要である。各構成材料の線膨張係数CTE(Coefficient of Thermal Expansion)[ $\times 10^{-6}/K$ ]は半導体のSiは3.9、SiCは4.4、接合材料であるSn-Ag-Cu系のはんだは20~22、基板のCuは16.5、電極材料のAl（アルミニウム）は23.9と、半導体素子と周辺部材金属とのCTE差は大きい。CTE差の異なる材料を接合し温度変化を与えると、材料間には熱応力が生じる。温度変化が大きいほど部材間の熱膨張差による変位量の差が大きくなるため熱応力は増大する。過大な熱応力は半導体チップクラックなどを生じ故障の原因となり得るため、SiCの性能を十分に発揮し、デバイスの高温動作化を実現するには、半導体素子と基板を接合する材料には高耐熱性のみならず、熱応力を緩和する作用が求められている。はんだ材料に代わる高温デバイス対応接合材料としては、Ag（銀）ナノ粒子接合材料の実用化が始まっているが、Agは材料コストや耐食性、接合時に還元雰囲気や加圧を要する点に課題がある。

本論文においては、パワーデバイスの高温動作化に求められる実装技術として、接合材料の“高耐熱性”と“熱応力緩和”を実現することを目的とし、高融点材料であるNiを基材として熱応力を緩和するために二種類の新たな技術を用いた実装技術の提案を行っている。

第一の技術は、低温焼結を可能とするNiナノ粒子に高い延性を持つAl粒子を組み合わせた、高耐熱・応力緩和型の焼結接合技術である。金属ナノ粒子を用いた焼結接合技術は、ナノ粒子の高い表面活性により材料融点よりも低温で接合可能で、高耐熱実装技術として有望視されている。Niナノ粒子はAgナノ粒子と比較して、耐食性などに優れるうえ、AlおよびNi被接合面に大気雰囲気中の加熱で接

合可能であることが、申請者の所属した先進材料研究室の先行研究で明らかになっていた。またマイクロサイズのAl粒子を複合化することでボイドを低減できることを見出している。しかし、他のAgやCuナノ粒子と同様に、接合時に数MPaの加圧を要していた。加圧はチップダメージによる不良発生や、製造コストが増大する。本研究では一定の条件下で、加熱時無加圧での接合が可能であることを見出した。さらに、これらの特徴がNiナノ粒子とAlとの界面反応に基因していることに着目し、界面状態と加熱雰囲気異なるNiとAl間の拡散挙動を解析することによって、接合機構を明らかにしている。

第二の技術は、低熱膨張金属であるFe-Ni(鉄-ニッケル)合金を半導体と基板との接合や中間層に用いることで半導体チップへの熱応力を緩和する実装技術である。近年の車載向けのパワーモジュールでは、半導体両電極面をはんだによってCu基板と接合する両面放熱構造が実用化されており、半導体チップへの熱応力は高まる傾向にある。インバー合金として知られているFe-Ni溶製合金のCTE( $\times 10^{-6}/K$ )は、Fe-36wt.%Niは2.0、Fe-42wt.%Niは4.3と半導体に近いことが示されている。本研究では半導体表面に低熱膨性のFe-Ni層をメッキによって形成し熱応力を緩和させることを着想している。また、先進材料研究室では独自の接合技術としてNiメッキによって半導体とCuリードフレームを接合する“Niマイクロメッキ接合(NMPB)”技術を開発している。山形形状に加工したリードフレームと半導体チップを対向させ、Niメッキを行い、リードフレームとチップとの隙間を緻密なメッキで埋めることで接合を実現するものである。このメッキ接合技術にFe-Ni合金メッキを適用することで半導体チップとCuリードとの熱膨張差を抑制した実装構造の実現の可能性を検証している。

本論文は6つの章から構成されており、各章の要約を以下に示す。

第1章においては本研究の背景及び目的について述べている。

第2章においては、Niナノ粒子接合材を用いた焼結による接合形成と評価をおこなった結果を述べている。Niナノ粒子-Alマイクロ粒子混合接合材を用いて、セラミックスとCuを積層したDBC(Direct Bonded Copper)基板とAl膜を電極表面に形成したSiチップとの接合性評価を行っている。大気雰囲気下350℃、保持時間15分、無加圧の条件で接合強度30MPa(Pbフリーはんだによるリフロー接合と同等)以上の十分な接合性を示した。また、破断部のAl粒子が延性破断していることから、デバイス動作に伴う温度変化に起因する接合部の応力緩和効果が期待できると結論づけている。さらにSiCパワーデバイスで想定される250℃の高温環境下における接合信頼性を評価した結果、1000時間では接合強度低下や接合層内の組織変化は生じないことを明らかにした。加圧やガス置換雰囲気制御機構を有するような特殊な装置を要せずに接合が可能であることを示している。

第3章においては、2章で述べている大気での接合性が優れていることの特徴の根幹をなす、NiとAlの界面の拡散挙動の解析をおこなっている。Ni/Al積層膜を作製し、Ni-Al界面のAl酸化膜の有無と熱処理雰囲気を変えた試料について、表面形態変化と表面から内部への組成変化をAES(Auger Electron Spectroscopy)

装置を用いて分析することで拡散挙動を論じている。Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(自然酸化膜)/Al構造では、大気加熱で表層Niの酸化が生じ、Al酸化膜を介してAl膜側へのNiおよびOの拡散、Ni膜側へのAlの拡散が生じるのに対し、真空加熱ではNiとAlの拡散はほとんど進行しないことを明らかにした。Niと自然酸化膜を有するAlの接合では、酸素の供給によりNi酸化膜の形成とそれに伴うAl酸化膜の欠陥生成によりAl酸化膜を介した拡散が生じるために、NiとAlとの大気接合が可能である要因であると結論している。

第4章ではFe-Ni合金メッキ条件の確立および応力緩和性評価について述べている。Fe-34~42wt%Ni合金メッキ膜を得るための、硫酸鉄、硫酸ニッケルを用いた浴組成と電流密度の最適条件を見出した。得られたメッキ膜のCTEは350℃以上の熱処理で $7 \times 10^{-6}/K$ 以下になることを明らかにした。応力評価では、実用パワーデバイスの表面電極構造であるNi/Al付きSiチップに厚み約8 $\mu$ mのFe-Niメッキ膜を形成することで、同じ厚みのNi膜のみのチップよりも温度変化(室温→250℃)による応力変化量が大幅に低減(70MPa→22MPa)することを実証した。

第5章では、Fe-Ni合金メッキによる接合と接合部評価について述べている。

Cu板に直径0.5mmのCuワイヤーを接合する形状の試料を作製し、接合強度評価、結晶組織評価を行った。その結果、硫酸鉄、硫酸ニッケル、塩化ニッケルを用いた浴組成で、微細粒の析出形態で緻密でボイドのない接合部が形成できる条件を確立した。また、350℃熱処理により接合部のFe-Ni合金は回復・再結晶を生じ、会合界面の強度が向上することにより、高い接合強度が得られることを明らかにしている。

第6章では本論文の結論を述べている。

以上のように本論文は高温動作可能なSiCパワー半導体デバイスに求められる高耐熱・低応力の実装技術として、Niナノ粒子-Alマイクロ粒子を用いた無加圧・大気加熱焼結接合技術、低熱膨張Fe-Ni合金メッキを用いた半導体電極の新構造ならびにめっき接合による応力緩和型実装技術を提案し、その差別性と実用可能性を明らかにしている。これらの成果は先駆的な知見であり、次世代パワー半導体の実装技術として、今後量産技術開発を経て市場に広く普及することが期待され、その先導的な役割をなしているものと認められる。

よって本論文は、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2023年9月13日

主査 早稲田大学 教授 工学博士 (ノースウエスタン大学) 犬石昌秀  
早稲田大学 教授 博士(工学)(早稲田大学) 三宅丈雄  
早稲田大学 教授 博士(理学)(大阪大学) 植田研二  
早稲田大学 名誉教授工学博士 (アーバン工科大学) 巽宏平