

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文概要

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
パワー半導体デバイス研究

2023年10月

< 研究背景 >

パワー半導体デバイスは電力変換・制御を行うデバイスであり、産業機器、電鉄車両、電気自動車などに用いられ、エネルギー利用を担うキーテクノロジーのひとつである。半導体素子には従来は Si 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。そこで、Si に比べて高い耐電圧、電子飽和度、熱伝導性といった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 を適用したデバイス開発・実用化が進められている。SiC は Si に対して高性能・高耐圧であり、また高耐熱であるため高温動作化が図れ、冷却系の簡素化によってデバイス全体として小型化、省資源化の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の Cu 基板への接合（実装）は、材料融点 200℃程度の Sn-Ag-Cu 系のはんだ材が用いられ、SiC デバイスに期待される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・材料が求められている。また、パワーデバイスの構成材料の熱膨張特性に着目すると、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 は 23.9 と、半導体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、熱膨張特性差に起因して材料間には熱応力がかかる。パワーデバイスはその動作に伴い発熱を生じ、また自動車分野では環境温度自体に温度差があるため、パワーデバイスの動作時には温度変化を伴う。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。

< 本研究の目的および独自性 >

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、本研究では高融点材料である 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研究を行った。

第一の技術は、低温焼結性を特徴とする 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、近年 Ag ナノ粒子を用いた技術が一部実用化されている。しかし、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。申請者の所属した先進材料研究室に

における Ni ナノ粒子接合材の先行研究では、Al および Ni 面に大気雰囲気での加熱で接合可能で、またマイクロサイズの Al 粒子を複合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、接合時に数 MPa の加圧を要し、ほかの研究例の Ag や Cu ナノ粒子も加圧が必要とされている。加圧はチップダメージによる不良発生や、製造コストが大きくなるため、本研究では加熱時無加圧での接合形成を目的とした。大気雰囲気での無加圧接合が実現できれば、実用化されている Ag ナノ粒子の課題を解決した接合材となり得る。また、Ni ナノ粒子が大気加熱で Al と接合可能である点について、Ni と Al 間の拡散挙動の観点から明らかにすることも本研究の目的とした。

第二の技術は、低熱膨張性金属である Fe-Ni 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の熱応力を緩和するメッキを用いた実装技術である。近年の車載向けの一部のパワーデバイスでは、半導体両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、半導体にかかる熱応力は高まる傾向にある。溶製合金の CTE [$\times 10^{-6}/K$] は、Fe-36Ni は 2.0、Fe-42Ni は 4.3 と半導体に近いことが示されている。そこで、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目指した。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)”技術を見出している。山形形状に加工したリードフレームと半導体チップを向かい合わせて 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と Cu との熱膨張差を抑制し、熱応力を緩和した実装構造の可能性を検証した。

< 研究内容の概要 >

焼結接合技術およびメッキを用いた実装技術の研究内容について、第 2 章から第 5 章に述べている。

第 2 章においては、Ni ナノ粒子-Al マイクロ粒子混合接合材を用いた焼結による接合形成と評価結果を述べている。セラミックスと Cu を積層した DBC(Direct Bonded Copper)基板と Al 付 Si チップとの接合に Ni-Al 接合材を用いその接合性評価を行った。その結果、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 を超える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ことが示された。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さずに接合が可能であることを示した。

第 3 章においては、2 章で述べている大気雰囲気での優れた接合形成が可能

となる機構の解明のために行った、NiとAlの界面の拡散挙動の解析について述べている。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分析することで拡散挙動を評価した。その結果Ni/Al₂O₃(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/Al構造では加熱雰囲気によらずNiとAlの相互拡散が生じる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、前章のNiとAlとの大気接合が可能であると明らかにした。

第4章では、低熱膨張Fe-Ni合金メッキ条件の確立およびSiチップにおける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条件として、硫酸鉄、硫酸ニッケルを用いた浴組成と電流密度条件を確立した。また、Fe-Niメッキ膜のCTEは350℃以上の熱処理で $7 \times 10^{-6}/\text{K}$ 以下になることを明らかにした。実デバイスの電極構造と同じNi/Al付きSiチップにFe-Ni膜を形成し、室温と250℃でのSiチップの応力を評価した。その結果、Fe-Ni膜付き試料は室温約31MPa、250℃約9MPa、同じ厚みのNi膜試料は室温約110MPa、250℃約40MPaの引張応力であり、室温と250℃での応力変化量はFe-Ni膜は約22MPa、Ni膜は約70MPaとFe-Ni試料において大幅に低減することを明らかにした。Fe-Niメッキ膜形成時の皮膜応力の低減およびFe-Niの低熱膨張性の作用によってSiチップの熱応力を低減可能であることを示した。

第5章では、低熱膨張性Fe-Ni合金メッキによる新たな実装構造での接合形成と評価について述べている。半導体と基板との接合にリードフレームを介してメッキで接合する形状を模擬し、Cu板に直径0.5mmのCuワイヤーをFe-Ni合金メッキで接合する形状の試料を作製し、メッキ条件の確立、高温保持試験を含めた接合強度評価、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を形成する条件を確立した。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、Fe-Ni合金メッキによって十分な強度を有する接合形成が可能であることを示した。

< 結言 >

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による応力緩和型実装技術、低熱膨張Fe-Ni合金メッキによる接合技術の有用性を明らかにし、次世代実装技術としての可能性を示すことができたと考える。