

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24656190

研究課題名(和文)水素誘起接合法によるパワー半導体モジュール部材間の接合

研究課題名(英文) Diffusion joint of power semiconductor module materials using hydrogen-charge and its discharge

研究代表者

村田 卓也 (Murata, Takuya)

山口大学・理工学研究科・助教

研究者番号：70263796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：金属の水素チャージ(吸蔵)とディスチャージ(放出)による表面活性化を利用して、パワーエレクトロニクス関連部材間を高真空雰囲気を用いずに拡散接合し、接合界面に耐熱性をもたせることを目的に検討を進めた。その結果、金属部材への水素チャージにより、該部材間が夫々に密着した接合界面を形成し、高強度かつ柔軟性に優れた力学的特性を示すことを見出した。金属の熱分析等の結果から、水素チャージに伴う酸化被膜の除去と格子歪導入に基づく元素拡散促進、ディスチャージによる還元雰囲気の導入と塑性変形性の付与が本質的效果であり、セラミックス-金属間接合の課題である残留応力緩和機構として有望であろうと議論した。

研究成果の概要(英文)：Using a surface activated metal with hydrogen charging and its discharge, electronics materials for the power-semiconductor module were diffusion-jointed without high vacuum atmosphere, reducing the heat and electrical resistance at the joint interface. As a result, the hydrogen charging to the metal formed a joint interface in close contact and the joints were found to exhibit the mechanical properties of superior strength and flexibility. The thermal analysis data suggested that hydrogen charging removes the oxide film and introduces lattice strain, while its discharging realizes reducing atmosphere and succeeding plastic deformation, being essentially effective to relax the residual stress at ceramics and metal junction.

研究分野：材料物性、電子計測

キーワード：拡散接合 水素チャージ・ディスチャージ パワー半導体モジュール セラミックス 熱応力緩和 塑性変形 電気インピーダンス

### 1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの低損失化、小型化と高温動作を実現するとして期待される SiC パワー半導体モジュール構成において、半導体 - 金属電極間だけでなく、金属電極 - 良熱伝導性（かつ電気絶縁性）セラミックス間のハンダ付けを超える接合技術の開発が期待される。接合箇所の耐熱性を想定すると、電気及び熱伝導の観点からも拡散接合が優位であるが、高温かつ高真空装置を用いた厳密な雰囲気制御等、その接合環境と装置構成に制約を受けるため、生産性に劣ることが知られている。

こうした背景から、水素吸蔵金属の化学活性に着目した新たな接合法を考案し、実用化に向けた基礎試験を進めたところ、水素吸蔵しない場合と比較して異種部材間が低温で接合し、接続性に優れる結果を得た。その本質的効果は、水素吸蔵（チャージ）に伴う金属表面酸化被膜の除去と格子歪の導入とともに、接合温度における水素放出（ディスチャージ）に伴う接合界面への還元雰囲気の導入と相互拡散の促進に伴う接合界面の塑性変形性の付与と想定した。

主には金属表面における水素の着脱が金属融点よりも相当に低温で生じることから、部材間の接合状態を接合温度以上で保持できる為、耐熱性確保に有効と考え、本研究の提案に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、水素チャージした金属を用いたパワー半導体 SiC - 金属電極間、並びに放熱基板用の良熱伝導性 AlN セラミックス - 金属電極間の非真空雰囲気における好適な拡散接合条件の把握を目的とした。その際、異種部材間の接合において最大の課題となる残留応力の緩和といった課題に対して、金属部材への水素チャージに伴う金属表面酸化被膜の除去、並びに格子欠陥の導入とその緩和による表面反応の活性化と接合部材の変形を利用した強靱な微構造に基づく熱耐久性を期待した。並行して、水素チャージした金属の物性評価を行い、上述した異種部材間の拡散接合における水素チャージとディスチャージの効果を比較することで、接合機構に関わる知見を得ることを目的とした。また、有限要素法等を用いた接合界面の状態評価の可否判定も行うこととした。

### 3. 研究の方法

(1) パワー半導体ウェハ、金属電極、及び良熱伝導性 AlN セラミックスを接合対象とし、陰極電解法で水素チャージした金属を接合材として、接合条件（接合温度、接合圧力、接合時間）を変化して窒素雰囲気中で接合試験を行った。基本的に貧接合性であり、かつその粒界構造から強度特性に課題を抱える AlN セラミックスについては製造プロセスの異なる焼結体を用いた場合の接合性についても比較した。なお、接合性の評価は、水

素チャージ処理の有無と接合条件（接合温度・接合圧力）を変化して接合体を作製し、その接合可否、接合界面の微構造、力学的特徴、接合体の電気的特徴といった観点から比較検討することとした。別途、有限要素法解析ソフトウェアを用いた構造計算を試みることも、電気インピーダンスを利用した熱環境下における接合界面の状態評価の手法についても検討した。

(2) 金属部材への水素チャージとディスチャージの異種部材間接合に対する効果を見積もる為に、水素吸蔵の確実な Ti を接合材として採用して AlN セラミックスとの接合性を評価する他、線膨張係数の似た SUS 部材との接合試験も行い、接合性を評価した。また、水素チャージした金属の熱的特性を評価するために昇温ガス脱離分析（TDS）、熱膨張測定（TE）等を行った。

### 4. 研究成果

パワー半導体構造に基き、サブミクロンスケール以下の傾斜接合層の実現を想定して SiC ウェハ - Al 金属 - AlN セラミックス間の接合実験を行って接合性を評価するとともに、該接合体の耐熱性をその場で評価する為に、使用熱環境下における電気インピーダンスによる接合体評価の準備も進めた。並行して、パワー半導体モジュールの耐熱性確保の基本となる金属 - AlN セラミックス間の接合試験を行い、接合機構に関する知見を得ることを目的とした物性評価も進めたところ、以下に示す成果を得た。

(1) 接合性と接続性において Al 金属の水素チャージの有効性を確認した。すなわち電極として実際のモジュールにも使用されている軟金属 Al を選定することで、当初予定したパワー半導体モジュール構成の根幹となる SiC ウェハ - 金属電極 - AlN セラミックス接合体（図 1）を作製し、接合界面の微構造観察から、金属への水素チャージの異種部材間の接合性と接続性における優位性を確認した。具体的には、接合材とした Al 金属の水素チャージにより、サブミクロンスケールでジグザグに組付く形の接合界面微構造を得た（図 2）。当初想定した傾斜接合層とは異なりセラミックスの粒破壊が見られる



図 1 SiC-Al-AlN 接合体

が、接合界面微構造に隙間やクラック等はなく、熱伝導に好適と思われる。

また、該接合層の形成は水素チャージの有無や接合条件だけでなく、接合部材にも依存することを確認した。すなわち、焼結プロセスと表面仕上げ程度の異なる AlN セラミックスを用いて接合試験を行ったところ、Al 金属の水素チャージとそのディスチャージにより金属表面の酸化被膜成長と残留応力によるものと思われる接合界面のクラックや隙間を回避できること、強度特性に優れるセラミックス部材を用いた場合にはセラミックスの粒界破壊を生じることなく接合可能であり、柔軟かつ強度に優れる傾向にあることを確認した。

加えて、SiC - Al 金属電極 - AlN セラミックス放熱基板間の接合界面微構造を比較したところ、金属の水素チャージの有無に寄らず隙間等なく密着して接合するが、水素チャージ処理はより傾斜的な接合界面を形成することを見出した。パワー半導体放熱基板 - 金属電極間の非真空雰囲気における接合において、実用の観点からも Al 接合材の選択とその水素チャージ処理の妥当性を示せたものと考えている。

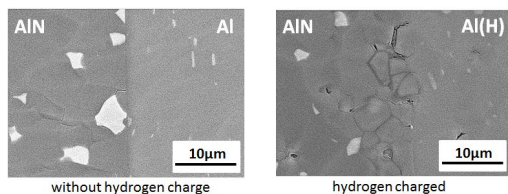


図2 AlN-Al-AlN 接合界面の微構造

- (2) 水素チャージした Al 金属の熱特性が水素吸蔵性が確実な Ti 金属を用いて得られた結果と同様な特徴を示したことから、接合機構に関する考察を進めた。すなわち、Al 金属の熱特性は水素吸蔵性に優れる Ti について行った特性評価から想起した「水素チャージの有無による接合性の違いは、水素チャージ（吸蔵）と接合条件下でのディスチャージ（放出）に伴うものと思われる、接合材表面の分子吸着性と極表面（ナノスケール）の塑性変形性の違いに起因する元素相互拡散状況変化に依る」という考えを裏付けた。具体的には、金属表面における水素チャージとそのディスチャージは吸着水分子による金属表面酸化層の形成を抑制するとともに、金属の再結晶に伴う塑性変形性に影響を与えるものと考えた。

また、接合時間を変化して作製した Al 金属 - AlN セラミックス接合体の微構造観察と水素チャージした金属の熱分析等の評価により、昇温時の還元雰囲気の導

入が金属部材表面の吸着水の低減によるものであり、一定水準で表面研磨したセラミックス部材に対しては、金属部材の再結晶点を上回る接合温度において水素チャージなしの場合でも接合性に影響を与えるであろうことを確認した。すなわち、水素チャージの効果は比較的低温において発現され、より高温で生じる金属再結晶に基づく部材バルクの状態変化に伴って金属内部からも加工によって導入された水素が放出されることで、接合条件（温度と圧力）に依存した変形程度を生じるであろうと議論した。

加えて、金属の水素チャージ条件とした通電電流密度の増加に合わせて金属表面からの水素放出温度が低温化し、その量も増加の傾向にあることを検出した。これらは、接合に対する水素効果のモデルとして想定した接合環境における還元雰囲気の出ただけでなく、水素導入に伴う金属表面の塑性変形性の付与の双方を妥当な要因として裏付ける結果である。

- (3) SiC - Al 金属 - AlN セラミックス接合体を作製し、大気中、300 までの熱環境下で電気インピーダンスを測定したところ、水素チャージした Al 金属を用いて作製した接合体の同特性が、水素チャージしていない金属部材を用いて作製したそれと比較して、同熱環境下において極めて安定であることを見出した。ただし、接合体の接合界面の微構造観察の結果は、おそらく数 10 ナノスケール以下での異種部材間接合状態を予見させるものであった。また、水素チャージしない場合の表面酸化層の残留やこれを基準とした接合後の残留応力の影響も受けることとなり、単純モデルに基いた有限要素法による熱応力分布の数値解析が極めて困難であろうと判断した。ただし、焼結プロセスの異なる AlN セラミックスを用いて作製した接合体試料の水素チャージ処理の有無に伴う異種部材間の接合界面微構造と電気インピーダンスを比較したところ、両者に対応する明確な差異を見出した。すなわちサブミクロンレベルの隙間や亀裂が接合体の電気的特性として検出でき、熱環境下でその場測定しうることを確認した。加えて、接合界面となる部材表面近傍の局所的な温度上昇に伴う水素脱離の効果が得られれば良いと考えて接合材を中心とした通電過熱を試みたが、温度制御が極めて困難であった。保持時間を変化して行った上述の接合試験において健全な接合層の形成には適当な保持時間が必要であったこともあり、良質な接合体の作製には至っていない。

## 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 1 件)

(1) 村田卓也、金属の水素チャージとディスチャージを利用した異種電子部材間の非真空雰囲気における拡散接合，セラミックス，51 (2016) 83-86.

〔学会発表〕(計 6 件)

(1) 村田卓也，金属の水素チャージとディスチャージを利用した非真空雰囲気における異種部材間の拡散接合，地方創生！南日本ネットワーク新技術説明会（2015 年 7 月 2 日（JST 会館，東京都千代田区））

(2) 村田卓也，金属の水素チャージとディスチャージを利用した非真空雰囲気における異種電子部材間の拡散接合，日本セラミックス協会 第 6 回高温電子セラミックスワークショップ（2015 年 3 月 18 日（岡山大，岡山県岡山市））

(3) 藤本武志，菊川祥吉，齋藤祐馬，村田卓也，パワー半導体モジュールに向けた異種電子部材間の非真空雰囲気における拡散接合，日本セラミックス協会秋季シンポジウム（2014 年 9 月 10 日（鹿児島大，鹿児島県鹿児島市））

(4) 藤本武志，菊川祥吉，村田卓也，水素チャージを利用した AlN セラミックス - Al 金属間の非真空雰囲気における拡散接合，日本セラミックス協会秋季シンポジウム（2013 年 9 月 6 日（信州大，長野県長野市））

(5) 菊川祥吉，植田義幸，藤本武志，村田卓也，水素チャージ金属を用いた金属 - 合金間の非真空環境における拡散接合日本セラミックス協会 2013 年年会（2013 年 3 月 16 日（東工大，東京都目黒区））

(6) 菊川祥吉，植田義幸，村田卓也，AlN セラミックス - 水素吸蔵 Ti 間の接合，セラミックス協会 2012 年秋季シンポジウム（2012 年 9 月 20 日（名古屋大，愛知県名古屋市））

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 卓也 (Takuya Murata)

山口大学・理工学研究科・助教

研究者番号：70263796

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：