

令和 6 年 4 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04709

研究課題名（和文）マルチレーザ加工技術を用いた先進パワー半導体用ヒートシンクシステムの創成

研究課題名（英文）Development of Heat Sink System for Advanced Power Semiconductor Device By Using Multiple Laser Beams Focusing System

研究代表者

芹澤 久（SERIZAWA, Hisashi）

大阪大学・接合科学研究所・教授

研究者番号：20294134

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）：本研究では、次世代のパワー半導体として期待されているシリコンカーバイド（SiC）製パワー半導体の活用に向けて、SiC半導体とヒートシンクとの間に、健全性ならびに冷却機能を保持する、新たな接合技術の開発を目的としている。  
熱間等方圧加熱法を用いて作製したSiC板と純タングステン薄膜との接合体の純タングステン薄膜表面に、青色レーザを熱源とするマルチレーザ加工システムを用いて、銅肉盛層を形成するための条件を確立するとともに、連続的な銅肉盛層の形成するための条件も見出すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、熱間等方圧加熱法を用いて作製したSiC板と純タングステン薄膜との接合体の純タングステン薄膜表面に、青色レーザを熱源とするマルチレーザ加工システムを用いて、銅肉盛層を形成することに成功した。この技術により、将来の次世代のパワー半導体として期待されるSiC製のパワー半導体への新たな冷却機構を構築することが可能になると期待され、SiC製パワー半導体の広範な活用への道筋を見出すことに成功した、創造性にあふれた研究成果である。またタングステンへの銅肉盛層の形成技術は、耐熱材料として期待されるタングステンの、多岐にわたる活用への新技術であり、その社会的意義も非常に高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, in order to develop a new heat sink system for the advanced power semiconductor device based on silicon carbide, by using the multiple blue laser beam focusing system, a line layer of copper has been successfully deposited on the thin tungsten plate which was directly joined to the silicon carbide plate through the hot isostatic pressing method. In addition, by shifting the multiple blue laser beam focusing system with an appropriate distance, the line layer of copper can be continuously developed so that the copper deposition layer seems to be produced and it would perform as the interlayer to connect between the power device and the heat sink.

研究分野：接合工学

キーワード：レーザ加工 異材接合 パワー半導体 ヒートシンク レーザ肉盛溶接 拡散接合

### 1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素排出量の削減を目的に、車をはじめとして輸送機器の電動化が積極的に進められているが、省電力化も重要な課題の一つであり、車載機器では小型・軽量化が重要な課題となっている。インバーターやコンバーターなどの電力変換器では、次世代のパワー半導体としてシリコンカーバイド (SiC) 製パワー半導体の活用が期待されているが、小型・軽量化にともなう熱設計が大きな問題となっている。一般に、パワーデバイスの構造は、半導体チップ、ヒートシンク、絶縁板の多層構造になっているため、層間を接続する材料が必要である。SiC 製パワー半導体は 250~300 度の高温での動作が期待されているが、これまでのシリコン (Si) 製パワー半導体に用いられてきた“はんだ”では耐熱性に問題がある。また、-40 度程度の極低温での動作も必要であり、その温度変化にも耐えられる新たな接合材料の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、タングステン薄膜を拡散接合させた SiC に、マルチレーザ加工技術を用いて、熱伝導に優れた銅の肉盛層を生成させる技術を確立させることで、先進 SiC 製パワー半導体用の、新たなヒートシンクシステムの創成技術を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず SiC 基材へのタングステン薄膜の接合方法を検討するとともに、タングステン薄膜を接合した SiC 基材のタングステン薄膜に銅肉盛層を生成方法の検討を行った。

(1) 20 x 20 x 2 mm の $\alpha$ -SiC 板材に、20 x 20 x 1 mm ならびに 20 x 20 x 0.025 mm の純タングステン薄膜への接合試験を行った。 $\alpha$ -SiC 基材の接合面をダイヤモンドスラリーで鏡面研磨後、純タングステン薄膜を重ね合わせ、一軸加圧のホットプレスを用いて温度 1600°C、圧力 20 MPa、保持時間 1 h、Ar 雰囲気中で接合し、タングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体を作製し、接合を切断後、断面を研磨し、SEM/EDS を用いて接合界面近傍部の微細組織観察を行った。

(2) 20 mm 角の板材を用いたタングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体作製試験結果に基づき、一軸加圧のホットプレスを用いて、50 x 50 x 1 mm (および 40 x 40 x 1 mm) の $\alpha$ -SiC 板材に 50 x 50 x 0.1 mm (および 40 x 40 x 0.1 mm) のタングステン薄膜を接合し、タングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体を作製した。なおホットプレスは 20 mm 角の場合と同じく、Ar 雰囲気中で、温度 1600°C、圧力 20 MPa、保持時間 1 h の条件である。作製したタングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体のタングステン表面に、マルチレーザ加工システム (図 1) を用いて、銅肉盛層の生成試験を行った。なお、銅肉盛層生成に際しては、レーザ出力、レーザ移動速度、銅粉体送給速度がパラメータとして変更可能である。本研究では、銅粉体送給速度を、20 mg/sec として、レーザ出力とレーザ移動速度を変化させて、銅肉盛層生成実験を行った。

### 4. 研究成果

(1) 純タングステン薄膜厚さ 0.025 mm、1 mm 共に、タングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体の作製は可能であり、本研究により、これまでに接合実績がなかったタングステン薄膜においても、固相拡散接合を用いたタングステン薄膜/ $\alpha$ -SiC 接合体が作製可能であることを示した。また、微細組織観察用の試験片加工時 (切断・研磨) にも接合体の剥離は生じなかったことから、両タングステン薄膜厚さの接合体ともに、機械加工に耐えうる程度の接合力は有していると考えられる。図 2 にそれぞれのタングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体の接合界面部の SEM による反射電子像 (BEI) を示す。BEI 像では原子番号の大きい元素は明るいコントラストを示し、元素番号の小さい元素は暗いコントラストを示す。タングステン厚さによらず、接合界面近傍部のタングステン側にはコントラストの異なる腕状組織を有する拡散相が観察される。この拡散相の厚さはタングステン厚さ 1 mm のタングステン/SiC 接合体で 12  $\mu$ m、厚さ 0.025 mm の接合体で 14  $\mu$ m であった。この拡散相をより詳細に観察するため、SEM/EDS 分析を行った結果、タングステン側の腕状の拡散相には Si が拡散していることが分かったが、今回検討した範囲でのタングステン厚さによる接合界面相への影響は少ないと考えられる。なお、作製したタングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体を用いて、銅肉盛層の生成試験を実施したところ、タングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体が剥離することは無かったが、タングステ

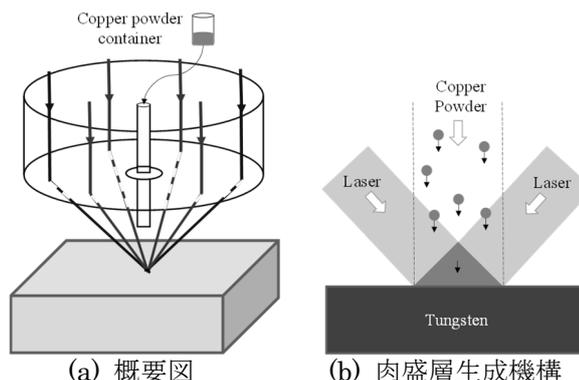


図 1 マルチレーザ加工システム

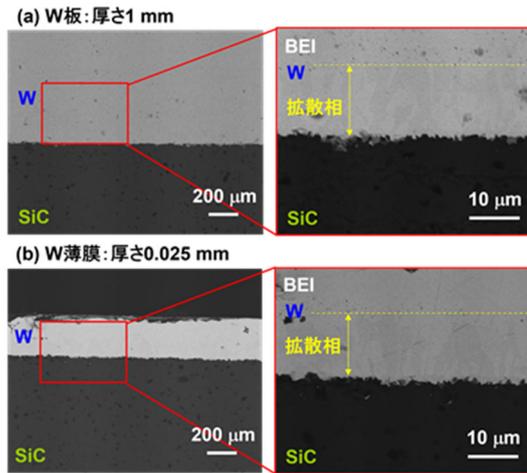


図 2 作製したタングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体の  
接合界面部近傍の反射電子像

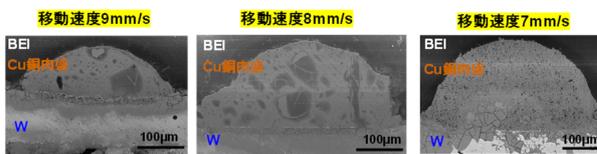


図 4 銅肉盛層の SEM 観察結果

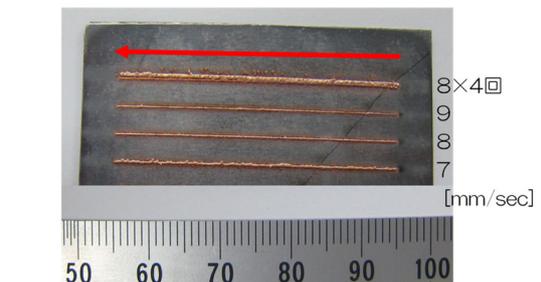


図 3 タングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体に作製した  
銅肉盛層の外観写真

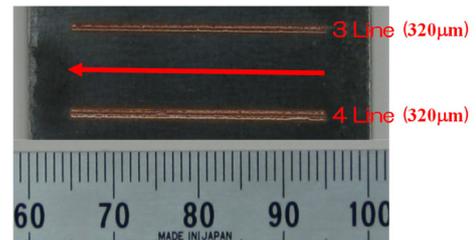


図 5 銅肉盛層連続生成後の外観写真

ン厚さ 0.025 mm の場合には、タングステン側への Si の拡散量が増加する結果が得られた。そのため、最適な銅肉盛層の生成実験では、純タングステン薄膜の厚さを 0.1 mm とし、 $\alpha$ -SiC 板材の厚さも 1 mm と薄肉化したタングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体を用いた。

(2) レーザ出力とレーザ移動速度とを変化させて、タングステン/ $\alpha$ -SiC 接合体への銅肉盛層の生成実験を行った結果、図 3 に示すように、レーザ出力 200 W で、レーザ走査速度 7, 8, 9 mm/sec の条件で、タングステン表面に接着した銅肉盛層を形成することに成功した。また外観上、8 mm/sec で形成した銅肉盛層が最良と思われたので、200  $\mu$ m ずつ、肉盛層生成位置をずらして、4 回連続で銅肉盛層生成実験も併せて行った。

生成した銅肉盛層の組織ならびに接合界面を調べるため SEM による組織観察ならびに EPMA 析を行った。SEM による組織観察結果を図 4 に示す。いずれの場合も、生成した銅肉盛層とタングステンとは密着しており剥離は認められなかった。ただし、移動速度 7 mm/sec の場合には、銅が部分的にタングステン内部まで侵食しているような傾向も認められ、移動速度が遅いことによる過度な熱量がタングステン薄膜も損耗したと考えられる。また、移動速度 8 mm/sec の場合、タングステンへの損耗は認められないが、生成した銅肉盛層内に、銅粉末が溶融せずに銅肉盛層内に閉じ込められてしまったと考えられる組織も認められた。さらに EPMA 分析結果からも、移動速度 7 mm/sec の場合には銅肉盛層内にタングステンが大きく拡散している結果が得られた。なお移動 8 mm/sec で、4 回連続で銅肉盛層生成を行った場合も、生成した肉盛層内に銅粉末が未溶融と考えられる組織も認められ、最良の移動速度は 9 mm/sec と考えられる。

そこで、移動速度 9 mm/sec の条件で、肉盛層生成位置のずらし量を 250 から 350  $\mu$ m の間で変化させた実験を行った。その結果、ずらし量 300  $\mu$ m 以下では、隣り合う銅肉盛層が再溶融して重なってしまう結果が認められた。その原因としては、タングステンと銅との濡れ性が良くないため、隣り合う肉盛層の生成時にタングステン表面に生成する前に、先行して生成した銅肉盛層に新たな銅肉盛層が生成されてしまったためと考えられる。一方、ずらし量 350  $\mu$ m の場合には、明らかに隣り合う銅肉盛層の間に大きな隙間が形成される結果となった。そこで、ずらし量を 320  $\mu$ m とし、3 回ならびに 4 回連続で銅肉盛層生成実験を行った結果、図 5 に示すように、連続した良好な銅肉盛層の生成に成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 雄二  (Sato Yuji)  (40422547)	大阪大学・接合科学研究所・准教授   (14401)	
研究分担者	中里 直史  (Nakazato Naofumi)  (70714864)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教   (10103)	
研究分担者	岸本 弘立  (Kishimoto Tatsuhiro)  (30397533)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授   (10103)	
研究分担者	塚本 雅裕  (Tsukamoto Masahiro)  (90273713)	大阪大学・接合科学研究所・教授   (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関