

令和元年9月11日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13676

研究課題名(和文) パワー素子に向けたダイヤモンド/シリコン常温接合とその結晶工学的機構の解明

研究課題名(英文) Room temperature bonding of diamond to Si for power device application and clarification of bonding mechanism

研究代表者

重川 直輝 (Shigekawa, Naoteru)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60583698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンド単結晶とSi基板の直接接合が1000℃の耐熱性を有することを実証した。本結果は、接合界面の中間層の固相・固相界面相形成、高耐熱性界面の実現に果たす役割の解明に向けた重要な結果である。本結果は、同時に、接合試料上のダイヤモンド結晶成長、素子作製が可能であることを示し、実用的価値も高い。あわせて、ダイヤモンド多結晶とアルミニウムの直接接合を達成した。これらより「半導体/ダイヤモンド/金属(ヒートシンク)」直接接合からなるパワーモジュール構造が実現可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1000℃という接合界面の極めて高い耐熱性は、シリコン基板上に接合されたダイヤモンド結晶上のダイヤモンド結晶成長、更にはダイヤモンド素子を作製可能であること、ダイヤモンドを熱拡散層とする「半導体素子/ダイヤモンド/金属ヒートシンク」というパワーエレクトロニクスモジュール実現の可能性を示しており、ダイヤモンドの応用開拓の観点から極めて高い価値を有する。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated that the diamond/Si interfaces fabricated by direct bonding show thermal tolerance against 1000 deg. Celcius. The obtained results are the first step for clarifying mechanisms for fabricating solid/solid interfaces at intermediate layer between diamond and Si. The results also imply that diamond layer can be epitaxially grown and device can be fabricated on diamond bonded on Si substrate. We also succeeded in direct bonding of polycrystalline diamond and Al, which means that junctions made of semiconductor/diamond/metal can be made.

研究分野：半導体直接接合

キーワード：単結晶ダイヤモンド 直接接合 シリコン 界面 アモルファス層

1. 研究開始当初の背景

(1) ダイヤモンドはSiの約5倍の禁制帯幅を持ち、最も高効率で大電力のパワー半導体となることが知られている。本研究以前に、我々はN₂ホールドーピングとAl₂O₃ゲート酸化膜により高寿命で実用水準のダイヤモンドトランジスタを作製可能とした[M. Kasu, et al. Appl. Phys. Express 5, 025701 (2012).]. ダイヤモンド結晶は市場レベルでは4mm角の人工単結晶が入手でき、研究レベルでは産業技術総合研究所が複数の結晶を並べCVD成長する方法により1インチのモザイク単結晶を作製している。しかしSiプロセスラインで要求される300mm~450mmの大口径に遠く及ばない。

(2) 我々は4H-SiCとSi単結晶を接合前の特殊な表面処理(超高真空中でのアルゴン原子ビーム(Fast Atom Beam, FAB)による表面活性化)を施した上で加熱無しの「SiC/Si常温接合」に成功していた[J. Liang, et al. Appl. Phys. Lett. 104, 161604 (2014).]. 接合後の4H-SiC/Si界面にはアモルファス層が存在するが、1000の熱処理を行うとアモルファス層が無くなることを見出していた。更に、作製された4H-SiC/Siダイオードの電気特性が熱処理によって改善することを明らかにしていた。更に我々は、本研究開始の直前に上記の手法をダイヤモンド単結晶・Si単結晶に応用し、「ダイヤモンド/Si常温接合」の形成に予備実験にて成功していた。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、表面の平坦化、活性化条件、接合条件の最適化を行い、技術的に高性能な界面を実現すること、具体的には基板全面での接合、さらに高温(例800)でも剥離しない接合を実現すること、ダイヤモンドと金属の直接接合を実現すること、「ダイヤモンド/Si常温接合」を固相・固相間の原子界面で起こる物理現象と捉え、常温接合現象の機構を結晶工学の観点から解明すること、である。

(2) 本研究の最終的な目的は、ダイヤモンドのパワー素子をSi LSIのプロセスラインで作製可能にするばかりでなく、Siの同一基板上でダイヤモンド素子と様々な機能(高周波増幅、センサー、演算機能、素子制御、アナログ・デジタル変換等)をもつSi LSIを組み合せ、多くのエレクトロニクス応用へ発展させること、熱拡散層としてのダイヤモンドとパワー素子、金属ヒートシンクの直接接合からなる、低熱抵抗、高出力、高効率の次世代パワーモジュールを実現すること、従来の液相・固相や気相・固相間の結晶成長と異なる固相・固相間の原子界面を介した結晶成長である「ダイヤモンド/Si常温接合」の機構の解明により、新しい学術分野を創出

すること、である。

3. 研究の方法

(1) 表面活性化接合法によりダイヤモンド単結晶とSi基板を接合し、断面TEM(Transmission Electron Microscope、透過型電子顕微鏡)やEELS(Electron Energy Loss Spectroscopy、電子エネルギー損失分光法)を用いて接合界面の原子構造を評価する。XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy、X線光電子分光法)を用いてダイヤモンド単結晶表面の電子状態を評価する。界面におけるアモルファス層の挙動、欠陥、転位の有無を評価し、接合条件、接合後の熱処理に対する依存性を明らかにする。接合界面の耐熱性向上を目指して試料形状(表面凹凸等)、活性化条件、接合条件が耐熱性等の接合の特性に及ぼす影響を明らかにし、これら諸条件を最適化することによりデバイスプロセスと整合する高耐熱性のダイヤモンド/Si接合を実現する。ダイヤモンドとSiの接合ノウハウをもとに、ダイヤモンドと金属の直接接合を目指す。

(2) さらにCVD法による接合上のダイヤモンド結晶成長、素子作製の検討を行う。また、ダイヤモンド/Si接合における固相-固相界面の形成メカニズムの解明を目指す。

4. 研究成果

(1) 表面活性化接合による単結晶ダイヤモンド/シリコン基板直接接合の形成及び接合界面の断面観察

ダイヤモンド単結晶表面を研磨し、1nm以下の平均表面粗さを実現した。表面活性化接合により、常温で、単結晶ダイヤモンドとシリコン基板の直接接合を達成した。接合条件の最適化により、Si基板との全面接合に成功した(図1)。

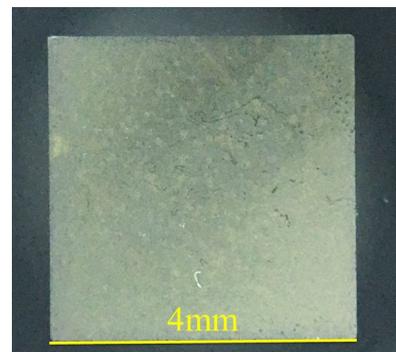


図1 Si基板に直接接合された4mm角ダイヤモンド単結晶。全面接合が得られている。

あわせて、SEMによる低倍率での断面観察により、界面に空隙が存在しないことを確認した(図2)。更にシリコンとダイヤモンドの熱膨張係数差にもかかわらず接合が1000の耐熱性を有することを実証した。我々は本成果を発展させてシリコン基板に接合され

たダイヤモンド単結晶上にダイヤモンド FET 用の結晶成長に成功している。これらは本技術のパワーエレクトロニクス素子応用を検討する上で重要な成果である。

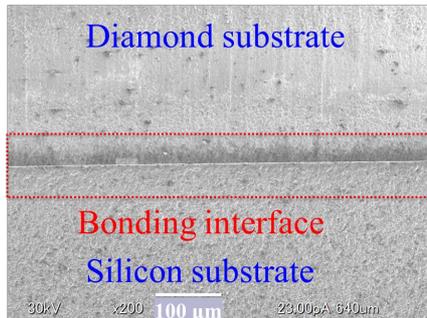


図2 ダイヤモンド/シリコン接合 SEM 像。

接合界面の断面 TEM 観察及び EELS による評価を行った。TEM 観察により接合界面に転位の生成は認められなかった。界面付近(厚さ数十 nm の部分)のダイヤモンド層から、軌道と軌道に由来する信号が検出された。一方ダイヤモンド結晶内部(界面から十分離れた部分)からは軌道に由来する信号のみが検出された。この結果は表面付近にアモルファス層が存在することを意味する(図3)。

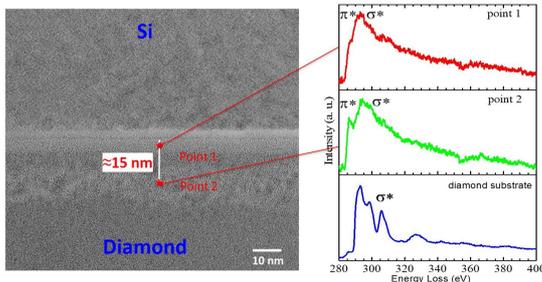


図3 ダイヤモンド/シリコン基板接合の断面 TEM 像及び EELS 信号。

(2) 単結晶ダイヤモンド表面の表面活性化処理によるアモルファス化

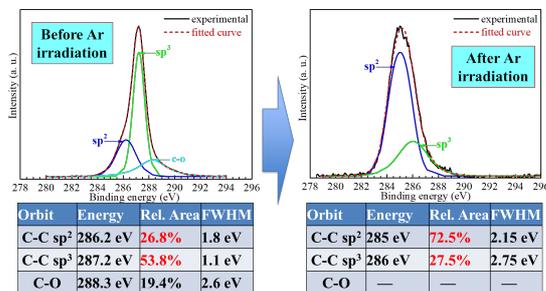


図4 FAB 照射によるダイヤモンド単結晶表面の XPS 信号の変化。

(1) で明らかとなったダイヤモンド単結晶表面のアモルファス化の原因を明らかにするために、接合形成時と同一条件でダイヤモンド表面に FAB 照射を行い、照射前後での表面状態の変化を XPS により評価した。炭素の 1S スペクトルの解析により、sp² 混成軌道と

sp³ 混成軌道の強度比は FAB 照射前で sp² / sp³=26.8% / 53.8% から、照射後に 72.5% / 27.5% へ変化した(図4)。sp² 信号強度の増加はダイヤモンド単結晶表面のアモルファス化が進んでいることを示す。今回の結果は、アモルファス化の原因が FAB 照射にあることを意味する。

(3) 表面活性化接合による多結晶ダイヤモンド/アルミニウム接合の形成
イギリス・ブリストル大学の Kuball 教授との共同研究により、多結晶ダイヤモンドとアルミニウムの直接接合を実現した(図5)。更に本接合が 600 以上の耐熱温度を示すことを見出した。(1)の結果とあわせて、直接接合により、半導体素子/ダイヤモンド/ヒートシンクという3層構造からなるパワーモジュールが実現可能であることを意味する。

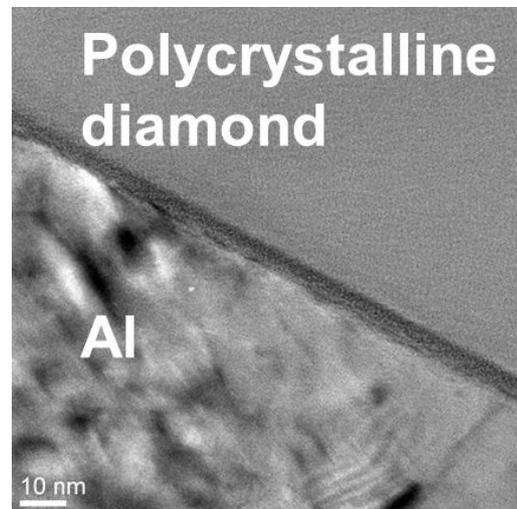


図5 多結晶ダイヤモンド/アルミニウム接合の断面 TEM 像。

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 2件)

Naoteru Shigekawa, "Bonding of Dissimilar Semiconductor Materials for Energy-Harvesting and Energy-Saving Devices (創エネ・省エネデバイスを目指す異種半導体材料の貼りあわせ)", J. Vac. Soc. Jpn. **60** (11), pp. 421-427 (2017) (7 pages) [査読有、招待論文] (DOI: 10.3131.jvsj2.60.421).

Jianbo Liang, Satoshi Masuya, Makoto Kasu, and Naoteru Shigekawa, "Realization of direct bonding of single crystal diamond and Si substrates", Appl. Phys. Lett. **110**, 111603 (2017) (4 pages) [査読有] (DOI: 10.1063/1.4978666).

[学会発表](計 4件)

Jianbo Liang, Shoji Yamajo, Martin

Kuball, and Naoteru Shigekawa, "Room-temperature direct bonding of diamond to aluminum", 12th international New Diamond and Nano Carbons Conference, A1.03 (Flagstaff, Arizona, USA, May 20-24, 2018).

梁 剣波、榎谷 聡士、嘉数 誠、Zhou Yan、Gucmann Filip、Singh Manikant、Pomeroy James、Kuball Martin、重川 直輝、「Si 基板と接合した単結晶ダイヤモンドの残留応力評価」第78回応用物理学会秋季学術講演会 8a-S22-6(福岡県福岡市、2017年9月5日~9月8日)

Jianbo Liang, Satoshi Masuya, Makoto Kasu, Manikant Singh, Michael J. Uren, Martin Kuball, and Naoteru Shigekawa, "Room temperature direct bonding of single crystal diamond and Si substrates for the combination of diamond devices with Si LSI", 8-8, 12th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (Kirishima, Kagoshima, Japan, Aug. 28-31, 2017).

梁 剣波、榎谷 聡士、嘉数 誠、重川 直輝、「ダイヤモンド単結晶と Si 単結晶基板の常温接合」第78回応用物理学会秋季学術講演会 15a-B1-7(新潟県新潟市、2016年9月13日~9月16日)

[図書](計 1件)

重川 直輝(分担執筆)「異種材料の接着・接合技術とマルチマテリアル化」第10章 第2節 常温異種材料接合技術によるパワー半導体、太陽電池の開発」(ISBN: 978-4-86104-682-7、技術情報協会、2017年10月31日刊)

[その他](計 2件)

嘉数 誠「ダイヤモンド電子デバイスの最近の進展」、応用物理学会応用電子物性分科会、2017年6月8日、大阪ホームページ等
http://www.shigekawa-ocu.jp/research_topics/diamond_Si_direct_bonding.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

重川 直輝 (SHIGEKAWA, Naoteru)
大阪市立大学・工学研究科・教授
研究者番号: 60583698

(2)研究分担者

嘉数 誠 (KASUU, Makoto)
佐賀大学・工学系研究科・教授
研究者番号: 50393731

(4)研究協力者

梁 剣波 (LIANG, Jianbo)