

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04581

研究課題名(和文) 縦型デバイス応用に向けた導電性ダイヤモンドとGaN、Ga₂O₃ヘテロ接合の形成研究課題名(英文) Heterojunction formation of conductive diamond and GaN, Ga₂O₃ for vertical device applications

研究代表者

梁 剣波 (Liang, Jianbo)

大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80757013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：常温においてダイヤモンドとGaNの直接接合に成功し、1000℃の耐熱性を有することを実証した。熱処理温度と界面構造、組成、結合状態の相関を解明した。ダイヤモンドとGa₂O₃の常温接合を達成し、熱処理前後の接合界面のナノ構造を観察し、界面構造とその組成成分を分析した。p⁺-Si/p-ダイヤモンドとn⁺-Si/p-ダイヤモンドヘテロ接合ダイオードを作製し、その電流-電圧および電流-電圧-温度特性を評価した。熱処理温度と界面のキャリア輸送特性の相関を解明し、理想係数の改善とリーク電流の低減を実現した。Si/ダイヤモンドヘテロ接合ダイオードの熱安定性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GaN/ダイヤモンド接合界面がGaNデバイス作製プロセスに必要な耐熱温度を有することを示し、高放熱性能を有するGaNデバイスの実現を可能にした。ダイヤモンドとGa₂O₃の常温接合の達成により、Ga₂O₃の低熱伝導率に起因する放熱問題の解決に対する可能性が示された。p⁺-Si/p-ダイヤモンドとn⁺-Si/p-ダイヤモンドヘテロ接合ダイオードが良好な電流-電圧特性を示し、直接接合による高機能性デバイスの実現性が示された。

研究成果の概要(英文)：GaN and diamond direct bonding were successfully fabricated at room temperature and the bonding interface demonstrated a high thermal stability of 1000 °C. The intermediate layer thickness decreased with increasing annealing temperature due to the direct conversion of amorphous carbon into diamond. After annealing at 1000 °C, the thickness of the intermediate layer was decreased to 1.5 nm, where lattice fringes were observed. These results demonstrate that the GaN/diamond heterointerface has high mechanical stability and can withstand the harsh device fabrication process. Room-temperature bonding of diamond and Ga₂O₃ was achieved, and the interface structure was investigated. p⁺-Si/p-diamond and n⁺-Si/p-diamond heterojunction diodes were successfully fabricated by direct bonding Si and diamond and their current-voltage and current-voltage-temperature characteristics were investigated. The improvement of the ideality factor and the reduction of the leakage current was obtained.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：ダイヤモンド GaN 放熱問題 Ga₂O₃ 直接接合 高耐熱性 ヘテロ接合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは、炭化シリコン(SiC)、GaN、Ga₂O₃のバンドギャップ(3.3~4.5 eV)を大きく上回る 5.5 eV と、非常に大きなギャップを有する新しいワイドギャップ半導体材料である。また、材料中で最高の熱伝導率(約 22 W/(cm・K))を有し、銅の約 6 倍である。現在、その大きなバンドギャップと最高熱伝導率に起因する優れた物性を活かすことを狙ったパワーデバイスの研究開発が盛んに行われている。次世代パワーデバイス用材料として超低損失パワー素子の実現が期待される一方、パワー半導体として根本的かつ大きな問題点が 2 つある。1 つは、*p* 型ダイヤモンドにおいては、アクセプター不純物 B(ボロン)ドーピングにより幅広い領域で正孔濃度を制御する技術が確立されていることに対し、*n* 型ドーピングに利用される P(リン)が室温での不活性化で、十分な電子伝導性を有する *n* 型ダイヤモンドが未だ実現されていない。もう 1 つの問題点は、半導体デバイス製造ラインに必要なとされる最低でも 2 インチサイズのダイヤモンド基板の作製が非常に困難である。

2. 研究の目的

本研究は、常温で *p* 型ダイヤモンド基板と GaN 及び Ga₂O₃ 基板の直接接合技術を開発し、電子伝導を有する *n* 型ダイヤモンドと大口径ダイヤモンド基板の欠如を将来的に解決するための技術を提案することを一番の目的とする。具体的には、本提案課題では、ダイヤモンド基板と、GaN、Ga₂O₃ 両基板の直接接合条件の最適化を行い、主にその界面における電気的特性、界面ナノ構造の評価、改善を図る。*p* 型ダイヤモンド/*n* 型 GaN 及び *p* 型ダイヤモンド/*n* 型 Ga₂O₃ 界面の電荷輸送特性の予備検討として *p* 型ダイヤモンド/*n* 型 Si と *p* 型ダイヤモンド/*p* 型 Si ヘテロ接合を作製し、電流 - 電圧特性の評価を行った。

3. 研究の方法

表面活性化接合法を用いて常温においてダイヤモンドと Si 基板上の GaN 薄膜および Ga₂O₃ 基板の直接接合の実現を目指した。接合界面の構造、接合の可否が接合基板表面の平坦性、基板の化学洗浄、ビームの照射条件(加速電圧、電流値、照射時間)、接合条件(加圧時間、荷重)、接合後の熱処理条件(温度、時間)等に大きく依存するため、接合プロセス条件を最適化したことによりダイヤモンドと GaN および Ga₂O₃ の直接接合を実現した。Ar ビーム照射によるダイヤモンド、GaN、Ga₂O₃ 表面構造や化学結合に及ぼす影響を調査した。ダイヤモンド/GaN 接合、ダイヤモンド/Ga₂O₃ 接合界面に対して、透過型電子顕微鏡(TEM)観察、電子線回折による評価を行った。接合界面の結晶構造(欠陥層の有無、厚さ)、界面の組成(界面付近のストイキオメトリ、相互拡散の有無)、化学結合状態、電子構造を解析した。表面、界面のナノ構造と接合条件、接合後の熱処理条件の関係を系統的に調査することにより、ダイヤモンドと、GaN および Ga₂O₃ 接合形成メカニズムを明らかにした。*p* 型ダイヤモンド/*n* 型 Si 及び *p* 型ダイヤモンド/*n* 型 Si ヘテロ接合を作製し、電流 - 電圧特性の評価を行った。

4. 研究成果

常温においてダイヤモンドと GaN の直接接合を実現した。熱処理前 GaN/ダイヤモンド接合界面の断面高分解能 TEM 像、EDS マッピング像および C、Ga、O、及び N 原子の X 線強度プロファイルを図 1 に示す。接合界面において厚さ約 5.3nm の中間層が形成され、その組成成分が EDS 分析より C、Ga、O、及び N 原子からなる原子混合層であることを明らかにした。また、酸素ピークの位置より中間層が主にダイヤモンドのダメージ層で、Ga と N 原子が中間層に拡散していることを解明した。界面に検出された酸素が接合装置中の残留酸素に起因すると考えられる。1000 熱処理後 GaN/ダイヤモンド接合界面の断面高分解能 TEM 像、接合界面の EDS マッピング像、C、Ga、O、及び N 原子の X 線強度プロファイルを図 2 に示す。熱処理前と比べ、熱処理後接合界面に形成された中間層の厚さは 1.5nm まで大幅に低減した。また、中間層においてダイヤモンドの結晶の[220]面に対応する格子縞が観察された。界面付近における C、Ga、及び N 原子の EDS プロファイルの立ち上がり急勾配になったことによって、熱処理によるダメージ層の再結晶化を示唆した。また、酸素ピーク強度の低下が観察され、酸素が熱処理によって GaN 側拡散したことに起因する。

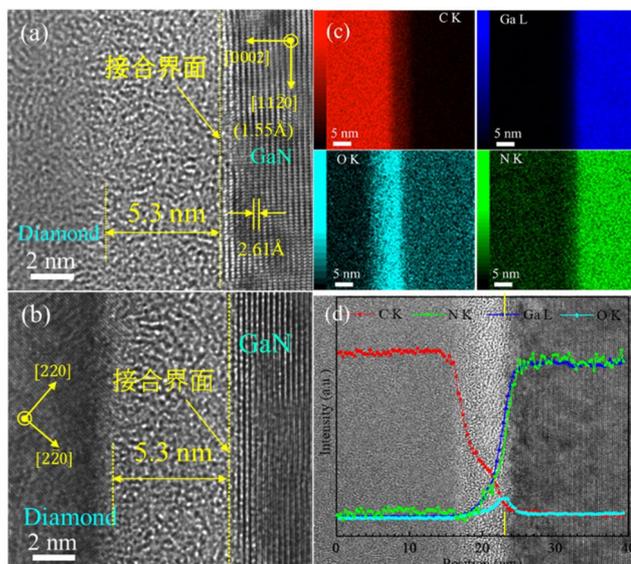


図1 熱処理前 GaN /ダイヤモンド接合界面の(a)GaN[1100]と(b)ダイヤモンド[001]晶帯軸に沿って観察した断面 HRTEM 像、(c)接合界面の EDS マッピング像、(d)接合界面全体の C、Ga、O、及び N 原子の X 線強度プロファイル (背部に挿入された TEM 像は、X 線強度プロファイルの測定位置を示す)

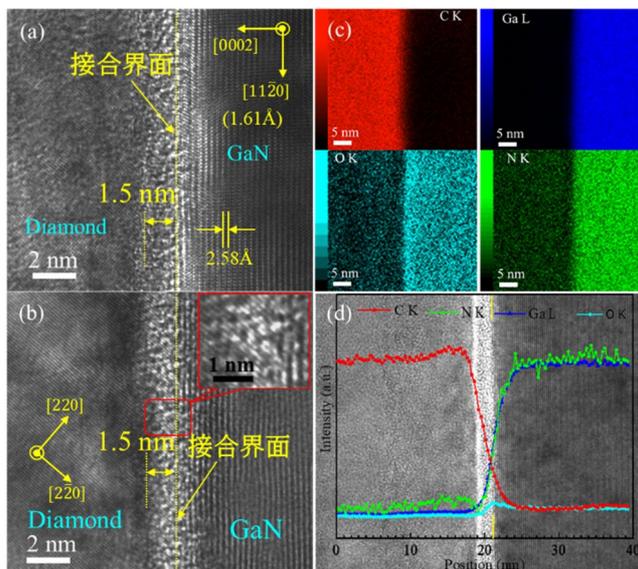


図2.1000 熱処理後 GaN /ダイヤモンド接合界面の(a)GaN[1100]と(b)ダイヤモンド[001]晶帯軸に沿って観察した断面 HRTEM 像、(c)接合界面の EDS マッピング像、(d)接合界面全体の C、Ga、O、及び N 原子の X 線強度プロファイル

熱処理前 GaN /ダイヤモンド接合界面の C-K エッジ電子エネルギー損失分光 (Electron Energy Loss Spectroscopy: EELS) スペクトルの位置依存性、EELS スペクトルから抽出した π と σ ピーク強度、及び sp^2 比を図3に示す。中間層における sp^2 比の変動より中間層は、2つの部分に分けられる。1つはアモルファスカーボンとダイヤモンドで構成され、もう1つは完全なアモルファスカーボンで構成されることを明らかにした。それらの厚さは、それぞれ約 3.2 と 2.8 nm と測定された。1000 熱処理後 GaN /ダイヤモンド接合界面の C-K エッジ EELS スペクトルの位置依存性、EELS スペクトルから抽出した π と σ ピーク強度、及び sp^2 比を図4に示す。接合界面における sp^2 比は熱処理後大幅に低減し、約 51% に達した。完全なアモルファスカーボンで構成された部分が消失し、アモルファスカーボンとダイヤモンドで構成された部分の厚さが約 2.6 nm までに低減した。中間層における実際 sp^2 比は、TEM サンプル製造プロセス中において FIB によって引き起こしたダメージ部分の sp^2 比を差し引いて、0 から 34% の間であると推定されている。アモルファスカーボン層厚さの低減がダイヤモンドへの変換に起因する。接合界面が 1,000 の熱処理に耐えることから、ダイヤモンドに接合された GaN 層の上に結晶成長やデバイス作製などを行うことで、ダイヤモンドの熱伝導性を最大限に発揮する GaN デバイスの実現が期待される。

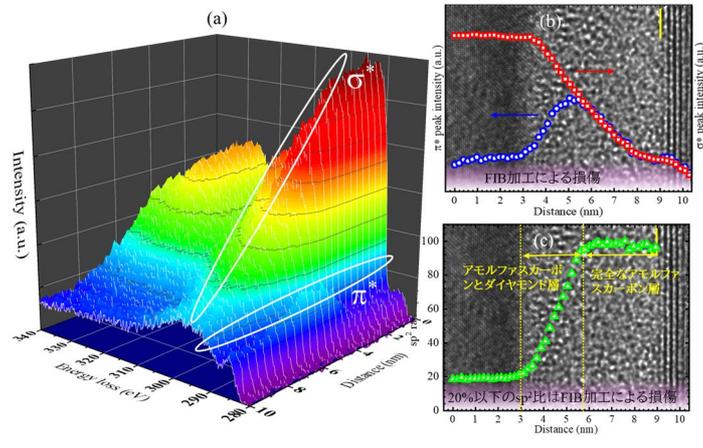


図3 .(a)熱処理前 GaN / ダイヤモンド接合界面の C-K エッジ EELS スペクトルの位置依存性と EELS スペクトルから抽出した(b) π^* と σ^* ピーク強度と(c) sp^2 比 ((b)と(c)に挿入された TEM 像は、EELS スペクトルの測定位置に対応する)

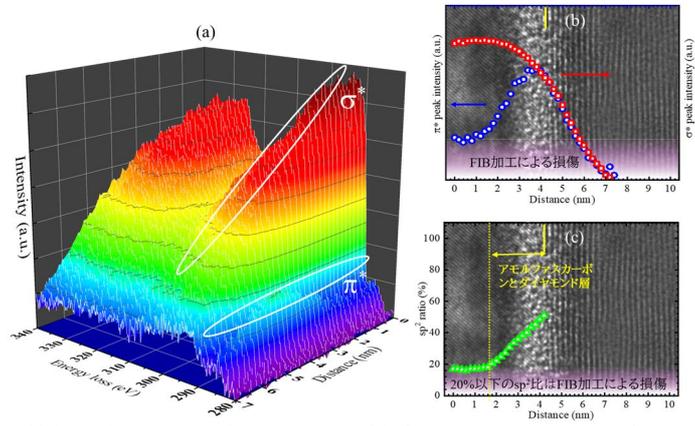


図4 .(a) 1 0 0 0 熱処理後 GaN / ダイヤモンド接合界面の C-K エッジ EELS スペクトルの位置依存性と EELS スペクトルから抽出した(b) π^* と σ^* ピーク強度と(c) sp^2 比 ((b)と(c)に挿入された HRTEM 像は、EELS スペクトルの測定位置を示す)

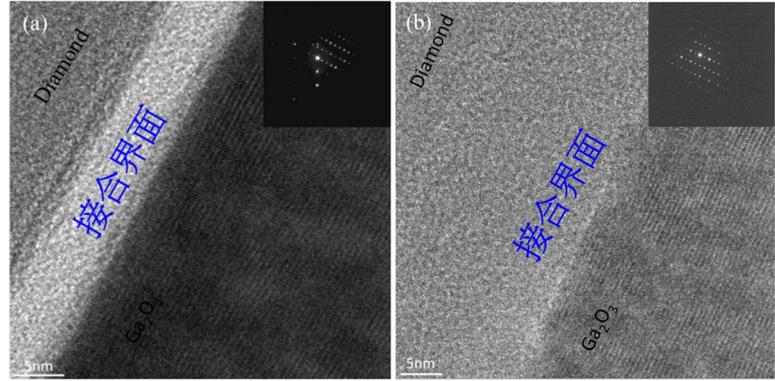


図5 .(a)熱処理前と(b) 8 0 0 熱処理後ダイヤモンド / Ga₂O₃ 接合界面の断面 TEM 像

ダイヤモンド基板と Ga₂O₃ 基板の直接接合に成功した。熱処理前と 8 0 0 熱処理後の接合界面の断面 TEM 像を図 5 に示す。熱処理前の接合界面に厚さ 7nm の中間層が形成され、熱処理後少し減少したことを確認した。中間層が接合プロセス中においてアルゴンビームの照射により形成したダメージ層だと考え、中間層厚さの低減が熱処理によるダメージ層の回復に関係する。Ga₂O₃ デバイス作製において結晶成長と電極形成に必要な熱処理温度は 8 0 0 程度である。従って、今回の結果はダイヤモンド / Ga₂O₃ 接合試料が Ga₂O₃ デバイス作製プロセスに適用することが可能であることを示した。ダイヤモンドの高熱伝導率を活かす高放熱性 Ga₂O₃ パワーデバイスの実現が期待される。

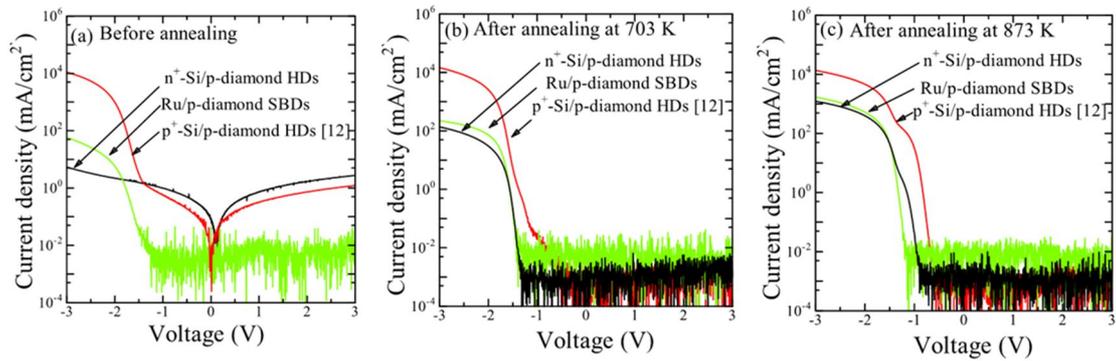


図 6. n⁺-Si/p-diamond と p⁺-Si/p-diamond ヘテロ接合と Ru/p-diamond ショットキーバリアダイオードの熱処理前後の電流 - 電圧特性

p 型ダイヤモンドと n 型 Si 及び n 型 Si を直接接合し、n⁺-Si/p-diamond と p⁺-Si/p-diamond ヘテロ接合ダイオードの作製を実現した。熱処理前後のヘテロ接合ダイオードの電流 - 電圧特性を図 6 に示す。参考試料として Ru/p-diamond ショットキーバリアダイオードを作製した。熱処理前 p⁺-Si/p-diamond ヘテロ接合ダイオードが優れた整流特性を示した。熱処理後 n⁺-Si/p-diamond と p⁺-Si/p-diamond ヘテロ接合ダイオードの電流 - 電圧特性が大幅に改善され、リーク電流値が Ru/p-diamond ショットキーバリアダイオードと比べ同程度である。p⁺-Si/p-diamond ヘテロ接合ダイオードの順方向電流値がショットキーバリアダイオードより高く、優れた整流特性を持つダイヤモンドヘテロ接合ダイオードの作製を実現した。熱処理温度と界面のキャリア輸送特性の相関を解明し、電流 - 電圧特性の理想係数の改善と逆バイアス電流の低減を実現した。電流 - 電圧特性において、ショットキーダイオードよりも優れた熱安定性を実証した。Si/ダイヤモンド接合のバリア高さ、飽和電流密度と温度、および室温での逆バイアス特性の関係を分析することにより、熱処理前後接合界面のバリア値を特定した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jianbo Liang, Ayaka Kobayashi, Yasuo Shimizu, Yutaka Ohno, Seong-Woo Kim, Koji Koyama, Makoto Kasu, Yasuyoshi Nagai, and Naoteru Shigekawa	4. 巻 33
2. 論文標題 Fabrication of GaN/Diamond Heterointerface and Interfacial Chemical Bonding State for Highly Efficient Device Design	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2104564
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202104564	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yota Uehigashi, Shinya Ohmagari, Hitoshi Umezawa, Hideaki Yamada, Jianbo Liang, and Naoteru Shigekawa	4. 巻 120
2. 論文標題 Fabrication of p+-Si/p-diamond heterojunction diodes and effects of thermal annealing on their electrical properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 108665
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.diamond.2021.108665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uehigashi Yota, Ohmagari Shinya, Umezawa Hitoshi, Yamada Hideaki, Liang Jianbo, Shigekawa Naoteru	4. 巻 130
2. 論文標題 Electrical properties of Si/diamond heterojunction diodes fabricated by using surface activated bonding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 109425 ~ 109425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.diamond.2022.109425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uehigashi Yota, Ohmagari Shinya, Umezawa Hitoshi, Yamada Hideaki, Liang Jianbo, Shigekawa Naoteru	4. 巻 61
2. 論文標題 Comparison of thermal stabilities of p+-Si/p-diamond heterojunction and Al/p-diamond Schottky barrier diodes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SF1009 ~ SF1009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac6480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liang Jianbo, Ohno Yutaka, Shigekawa Naoteru	4. 巻 61
2. 論文標題 Direct Bonding of Diamond and Dissimilar Materials at Room Temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materia Japan	6. 最初と最後の頁 334 ~ 339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.61.334	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 梁剣波、重川直輝	4. 巻 3
2. 論文標題 ダイヤモンドと異種材料の直接接合による超耐熱マテリアルの開発とその応用について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊マテリアルステージ	6. 最初と最後の頁 67-70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 梁 剣波、清水 康雄、大野 裕、永井 康介、重川 直輝
2. 発表標題 GaN/ダイヤモンド接合界面の特性評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上東 洋太、大曲 新矢、梅沢 仁、山田 英明、梁 剣波、重川 直輝
2. 発表標題 n+-Si/p-ダイヤモンドヘテロ接合ダイオードの作製と電気特性評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Ayaka Kobayashi, Yasuo Shimizu, Yutaka Ohno, Seong-Woo Kim, Koji Koyama, Makoto Kasu, Yasuyoshi Nagai, Naoteru Shigekawa, and Jianbo Liang
2. 発表標題	Fabrication and Characterization of GaN/Diamond Bonding Interface
3. 学会等名	2021 IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yota Uehigashi, Shinya Ohmagari, Hitoshi Umezawa, Hideaki Yamada, Jianbo Liang, and Naoteru Shigekawa
2. 発表標題	High Temperature Stability of p+-Si/p-Diamond Heterojunction diodes
3. 学会等名	2021 IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yota Uehigashi, Shinya Ohmagari, Hitoshi Umezawa, Hideaki Yamada, Jianbo Liang, and Naoteru Shigekawa
2. 発表標題	Fabrication and electrical characterization of n+-Si/p-diamond heterojunction diodes
3. 学会等名	The 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2022 (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	上東 洋太、大曲 新矢、梅沢 仁、山田 英明、梁 劍波、重川 直輝
2. 発表標題	表面活性化接合法によるダイヤモンド/Siヘテロ接合ダイオードの作製
3. 学会等名	第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 東 洋太、大曲 新矢、梅沢 仁、山田 英明、梁 剣波、重川 直輝
2. 発表標題 Si/ダイヤモンドヘテロ接合ダイオードの耐熱性評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Liang, Y. Shimizu, Y. Ohno, Y. Nagai, and N. Shigekawa
2. 発表標題 Thermal Annealing Effect on the Structure of GaN/Diamond Bonding Interface
3. 学会等名 The 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jianbo Liang, Yutaka Ohno, Naoteru Shigekawa
2. 発表標題 High Performance GaN-on-Diamond Devices Fabrication using Diamond Wafer Bonding Technology
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop 2023 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 梁 剣波 (担当: 第7章3節)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 405
3. 書名 ラマン分光スペクトルデータ解析事例集	

〔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	重川 直輝 (Shigekawa Naoteru) (60583698)	大阪市立大学・大学院工学研究科・教授 (24402)	

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