

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15044

研究課題名（和文）高性能パワー半導体実現のための β -Ga203/ダイヤモンド直接接合研究課題名（英文）Low-temperature direct bonding of β -Ga203/diamond for advanced power electronics

研究代表者

松前 貴司 (Matsumae, Takashi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：10807431

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）：本研究では次世代パワー半導体として期待されるが熱伝導率の低い酸化ガリウムを、固体中最大の熱伝導率をもつダイヤモンド放熱基板と直接接合する技術を達成した。酸化ガリウム結晶とダイヤモンド結晶を、材料間の非晶質層1 nm厚以下で直接接合する技術を開発した。酸化ガリウム薄膜をダイヤモンド放熱基板と直接接合することで、酸化ガリウム基板単体よりも通電時の発熱を抑えることができた。さらにn型酸化ガリウムとp型ダイヤモンドを直接接合することで、高い整流比をもつpnジャンクションを形成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回実施が容易という特徴をもつ大気中での直接接合を採用した。Siなどの既存の半導体材料の直接接合では接合界面に酸化物の障壁層ができていたが、酸化物である酸化ガリウムと、表面酸化層ができないダイヤモンドの間では上記障壁層が数原子レベルまで抑制できることが分かった。これにより酸化ガリウムからなるパワー半導体からダイヤモンド放熱基板への理想的な放熱が期待され、新しい省エネデバイスの実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Gallium Oxide (Ga203) is regarded as a future power electronics material but has a low thermal conductivity. For the efficient heat dissipation for the Ga203 power device, we have developed the direct bonding technique between Ga203 and diamond substrates. The thickness of the amorphous layer at the Ga203/diamond interface was less than 1 nm. The thermal resistance of the Ga203/diamond hetero-structure was reduced than the conventional Ga203 substrate. In addition, the rectification property was demonstrated by using the direct bonded n-Ga203/p-diamond interface.

研究分野：表面・界面

キーワード：酸化ガリウム ダイヤモンド 直接接合 放熱構造 pnジャンクション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

省エネルギー社会の実現のため効率的な電力制御を行うパワー半導体が発展している。パワー半導体における電力損失の低下が求められる中で、主流材料である Si はデバイス性能が材料の限界に迫っており、より望ましい物性をもつ材料が注目されている。

候補材料の中でもバンドギャップの大きい酸化ガリウム(Ga_2O_3)をパワー半導体として用いることで、高圧電力の低損失制御が期待できる。また Ga_2O_3 は他の新材料と異なり常圧で融点をもつため、Si のように融液からの成長による低価格での高品質基板の製造が見込める。しかしながら Ga_2O_3 は熱伝導率が低いため放熱効率が低く、発熱量の大きい高出力電力の制御時に自己発熱により動作不良になってしまう。この課題が Ga_2O_3 から成るパワー半導体の実用化への障害となっている。

2. 研究の目的

上記課題の解決策として、 Ga_2O_3 を熱伝導率の高い放熱基板と複合化することが挙げられる。本研究では固体中最高の熱伝導率を持つダイヤモンドからなる放熱基板を Ga_2O_3 と複合化することを目指す。ダイヤモンドを放熱構造として活用するには熱伝導率の低い接着剤による複合化でなく、 Ga_2O_3 とダイヤモンドが原子レベルで直接接合した構造が望ましい。熱膨張係数・格子定数の異なる Ga_2O_3 とダイヤモンドは結晶成長にて複合化が難しいが、本研究では Ga_2O_3 デバイスとダイヤモンド放熱基板の表面官能基同士を反応させる技術を確立し、効率的な放熱構造の実現を目標とする。

3. 研究の方法

本研究では図1のように Ga_2O_3 とダイヤモンドの表面同士を -OH 基で官能基化し、それらを脱水反応させることで直接接合するプロセスを開発した。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板とダイヤモンド基板の表面をそれぞれ酸素プラズマおよび酸化性洗浄液により -OH 末端化し、これらを大気中にて重ね合わせた。これらを 250°C で加熱し熱脱水反応を起こすことで、材料同士を原子レベルで結合させた。

接合界面の機械強度をシェア試験機、微細構造を透過型電子顕微鏡で評価した。また電力を負荷して Ga_2O_3 を発熱させ、温度上昇をサーモグラフィにより測定し放熱効率を評価した。加えて直接接合した n 型 Ga_2O_3 と p 型ダイヤモンド間における電気伝導性を評価した。

4. 研究成果

図2に接合した $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板とダイヤモンド基板の写真を示す。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板が白く見えてお

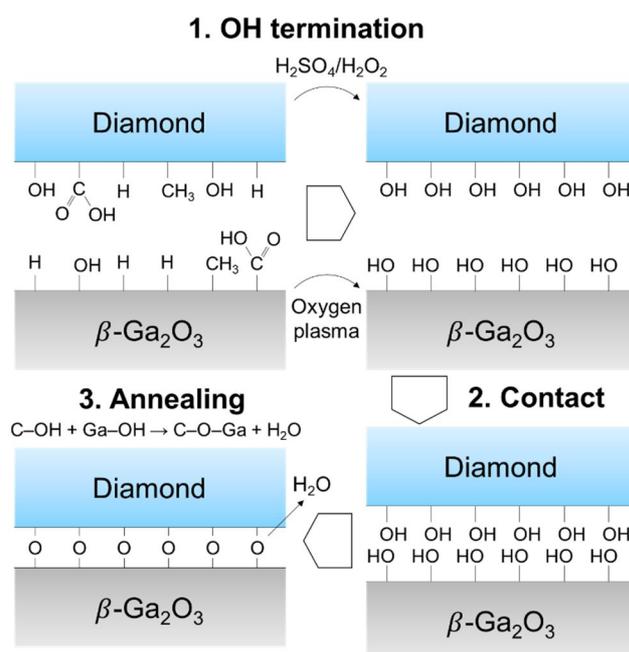


図1 本研究で開発した直接接合プロセス

り、その上に 3 mm 角のダイヤモンド基板が 2 枚接合されている。ダイヤモンド基板は透明であり接合していない箇所にてニュートンリングが見えるが、全体の 7 割程度が接合できている。分子間力により Ga_2O_3 薄膜をダイヤモンド放熱基板上に転写した例があるが、材料同士の結合が弱いため Ga_2O_3 薄膜の大きさは数百 μm 程度に留まった。今回の研究では表面同士を直接接合することで数 mm サイズの複合構造が得られており、より大きく平坦な基板を用いることで産業レベルのウェハサイズ化も見込まれる。

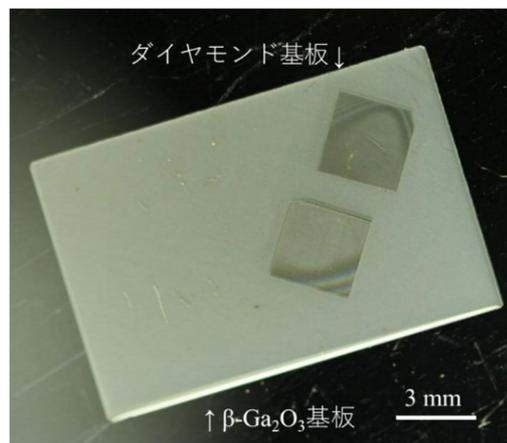


図 2 接合試料の写真

透過型電子顕微鏡により観察した $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /ダイヤモンド接合界面の微細構造を図 3 に示す。像より $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板とダイヤモンド基板が原子レベルで欠陥なく結合を形成していることがわかる。

また透過型電子顕微鏡による観察では電子線の回折により、結晶性を有している部分では規則的な模様が観察される。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ・ダイヤモンドの結晶内部では規則的な模様が観察されている。他の接合手法では接合プロセス中に結晶が壊れ、熱伝導率の低い非晶質層が~数十 nm 厚程度生じてしまう。今回実現した表面反応による接合では結晶内部へのダメージが少ないため非晶質層は~1 nm 厚に抑えられており、放熱への悪影響は少なく効果的な放熱を実現できると考えられる。

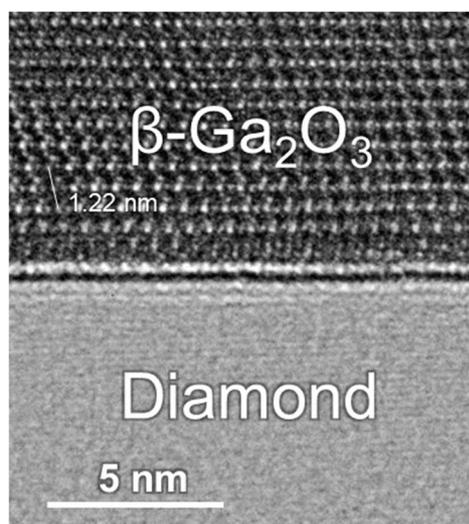


図 3 接合界面の微細構造

さらに $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜/ダイヤモンド放熱基板の複合構造を作製し、電力負荷時の温度上昇を $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板と比較した。500 μm 厚の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板上に通電した際の温度上昇が 9.7 $^\circ\text{C}$ である条件において、10 μm 厚の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜と 500 μm 厚のダイヤモンド放熱基板と直接接合した試料の際には温度上昇を 6.7 $^\circ\text{C}$ と低温化することができた。

加えて n 型の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板と p 型のダイヤモンド基板を直接接合することで、図 4 のように 10^7 程度の整流比をもつ pn ジャンクションを実現した。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は p 型化が難しく、ダイヤモンドも n 型が作製しにくいいため単一の材料では pn ジャンクションを形成しにくいという課題がある。今回、界面の障壁層を数原子レベルまで抑制して接合できるようになったことで、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ とダイヤモンドを用いたバンドギャップの大きな pn ジャンクションが可能になり、今後新規ヘテロデバイスへの展開が期待される。

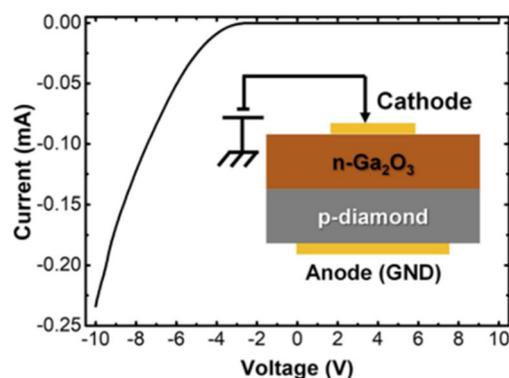


図 4 n 型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板/p 型ダイヤモンド接合体の界面電気特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Takashi Matsumae, Yuichi Kurashima, Hideki Takagi, Hitoshi Umezawa, Eiji Higurashi	4. 巻 191
2. 論文標題 Low-temperature direct bonding of diamond (100) substrate on Si wafer under atmospheric conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 52-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scriptamat.2020.09.006	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 Shoya Fukumoto, Takashi Matsumae, Yuichi Kurashima, Hideki Takagi, Hitoshi Umezawa, Masanori Hayase, Eiji Higurashi	4. 巻 117
2. 論文標題 Heterogeneous direct bonding of diamond and semiconductor substrates using NH ₃ /H ₂ O ₂ cleaning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 201601-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0026348	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 Sittimart Phongsaphak, Ohmagari Shinya, Matsumae Takashi, Umezawa Hitoshi, Yoshitake Tsuyoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Diamond/ -Ga ₂ O ₃ pn heterojunction diodes fabricated by low-temperature direct-bonding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105114 ~ 105114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0062531	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi Matsumae, Yuichi Kurashima, Hideki Takagi, Hitoshi Umezawa, Koji Tanaka, Toshimitsu Ito, Hidekyuki Watanabe, Eiji Higurashi
2. 発表標題 Hetero-Integration of -Ga ₂ O ₃ and Diamond Substrates by Hydrophilic Bonding Technique
3. 学会等名 Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science 2020 (PRiME 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松前 貴司, 倉島 優一, 高木 秀樹, 梅沢 仁, 田中 孝治, 伊藤 利充, 渡邊 幸志, 日暮 栄治
2. 発表標題 -Ga203薄膜とダイヤモンド基板の低温直接接合
3. 学会等名 2020年度精密工学会 秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔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

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