

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01363

研究課題名（和文）原子レベルの構造制御技術開発によるダイヤモンドMOSFETの高移動度・高耐圧化

研究課題名（英文）Development of atomic-level structure fabrication technique for diamond MOSFETs with high mobility and high voltage

研究代表者

松本 翼（Matsumoto, Tsubasa）

金沢大学・ナノマテリアル研究所・准教授

研究者番号：00739568

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,560,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンドMOSFETにおいて、現行のメタルマスクを介した選択成長技術を用いたソース・ドレイン領域の形成では、チャネル部に微細な荒れが生じるというプロセス課題があった。これに対し、本研究では、下地基板による成長速度差を用いた方法、面内方向にのみ成長するラテラル成長法、Niが炭素を固溶する性質を用いたダマシンライクな方法を提案し、その実証を進めた。その結果、いずれの方法でもMOSFETの動作実証に成功し、従来の特性よりも一桁近く、移動度を改善することに成功した。一方で、それぞれの手法の課題も見えてきた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、デバイス作製プロセスに幅を持たせることができた。開発した各デバイス作製プロセスは、課題も多く抽出された。それでも「ダイヤモンド半導体をSiと同等以上に構造を加工・制御することは可能なのか」という最初に立てた問いに対する答えとして、「ダイヤモンド半導体もSiと同等の構造を加工することはでき、各プロセスを高度化することで、Si以上に制御することも可能」という解が得られたと考えている。開発したデバイス作製プロセスは、目指すパワーデバイスだけではなく、量子デバイスや光デバイスにも広く応用され、ダイヤモンドエレクトロニクス産業創出に寄与すると期待している。

研究成果の概要（英文）：In diamond MOSFETs, the formation of source and drain regions using the current selective growth technique through a metal mask poses a process problem of fine roughness in the channel region. In response to this problem, this study proposed and demonstrated a method that exploits the growth rate difference due to the underlying substrate, a lateral growth method that grows only in the in-plane direction, and a damascene-like method that exploits the property of Ni to form a solid solution with carbon. As a result, the operation of MOSFETs has been successfully demonstrated with each method, and mobility has been improved by nearly an order of magnitude compared to conventional features. However, problems with each method have also become apparent.

研究分野：電子工学

キーワード：ダイヤモンド 半導体 MOSFET エッチング CVD

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは、半導体材料の中でも圧倒的なキャリア移動度、絶縁破壊電界、熱伝導率といった物性値を有しており、高周波・大電流・高耐圧デバイス材料として期待されている。申請者は、高周波・大電流・高耐圧デバイスとして最も信頼性に優れ、世界中で使用されている反転層チャネル動作の MOSFET を、2016 年に世界で初めてダイヤモンド半導体を用いて実現した。反転層チャネル動作の MOSFET を始めとするダイヤモンド半導体デバイスを実用化していくためには、他のデバイス材料と同様に、デバイス特性、コスト、信頼性といった課題をクリアしていかなければならない。一方で、ダイヤモンドが機械的・化学的に安定であるが故に、デバイス作製プロセスの選択肢が大きく制限され、結果としてデバイス特性の制限や高コストにつながっている。ダイヤモンド半導体デバイスの研究開発、実用化を進めるにあたって、『ダイヤモンド半導体を Si と同等以上に構造を加工・制御することは可能なのか』という点は、学術的にも実用的にも重要な問いである。

2. 研究の目的

反転層ダイヤモンド MOSFET のチャネル移動度を向上させ、高い絶縁破壊電界を実証すべく、ダイヤモンド半導体特有のデバイス作製プロセスを構築することを目的に、従来のデバイス作製プロセスと独自のダイヤモンド特有プロセス、新たなアイデアを組み合わせたデバイス作製プロセスを開発する。

3. 研究の方法

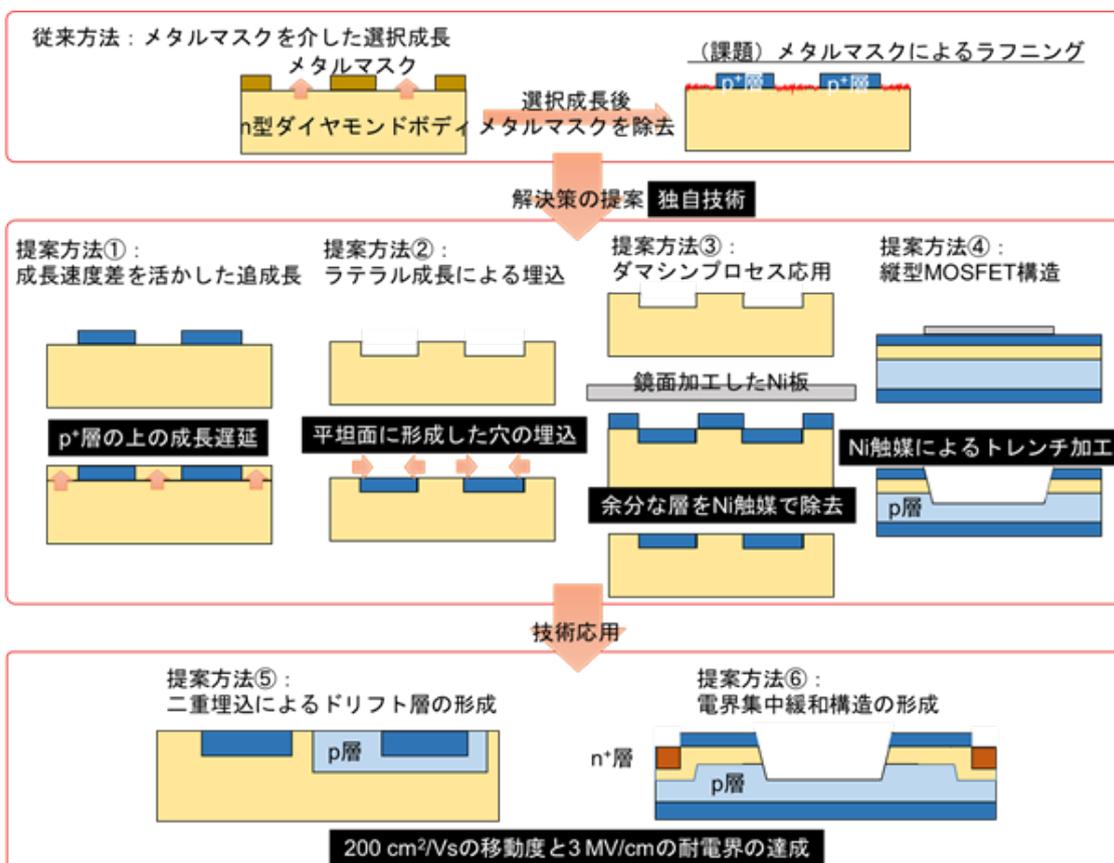


Fig. 1 現行の選択成長プロセスと本研究で実現を目指す新規デバイス作製プロセス

Fig. 1 に現行の選択成長プロセスと本研究で実現を目指す新規デバイス作製プロセスを示す。提案方法①は、選択成長後に追成長を行い、荒れたチャネル表面を原子レベルの精度で整える方法である。この方法は、経験上得られている n 層上にダイヤモンド薄膜を堆積するときと p⁺層上に堆積するときで成長開始までのインキュベーションタイムが異なる結果を利用したものである。この p⁺層上へのダイヤモンド薄膜の成長開始が遅い原因についてはまだわかっておらず、この解明も合わせて行った。提案方法②は、原子的平坦面上にドライエッチング装置等で空けた穴を p⁺層のラテラル成長で埋める方法である。ラテラル成長の条件下では、ダイヤモンド上に核形成が起こりにくいため、平坦面を維持したまま、穴を埋めることが可能である。本学ではラテラル成長技術の研究開発を得意としており、原子的平坦面を形成する技術を有している。本研究

における p⁺層のラテラル成長は新たな独自技術として確立を目指した。提案方法③は、Si の配線技術に用いられているダマシンプロセスの応用である。ダイヤモンドを Ni 板で平坦化する手法は特許申請済であり、本方法を応用例の一つとして提案した。本方法が最も生産性に優れていると考えており、時間をかけてでも実現しなければならない技術の一つである。提案方法④は、大電流化において必要不可欠な縦型 MOSFET 構造の作製であり、最もプロセス確立の可能性が高い。既にダイヤモンド単膜においてのトレンチ構造形成技術を論文で報告しており、それを積層構造に適応させることを試みた。

4. 研究成果

代表的な結果として、提案方法③の Ni 板を用いた平坦化技術を用いた手法を紹介する。Fig. 2 に、本研究で開発した Ni の炭素固溶反応を用いた埋め込み pn 接合形成プロセスを示す。はじめに、Ni をパターニングして蒸着させ、H₂/Ar 雰囲気中で熱処理を行う。すると、Ni が炭素を固溶するため、ダイヤモンド表面にトレンチが形成される。Ni を除去後、埋め込みたい層を全面に堆積させる。最後に、Ni 板を用いて、不要な飛び出た構造から炭素を固溶して、平坦化することで埋め込み pn 接合を形成することができる。

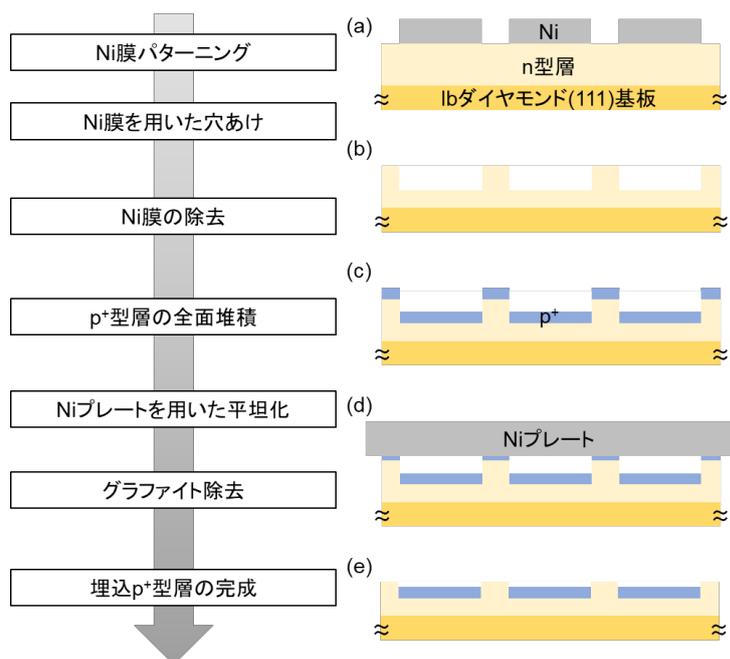


Fig. 2 本研究で開発した Ni の炭素固溶反応を用いた埋め込み pn 接合形成プロセス

Fig. 3 に Fig. 2 のプロセス後に、アルミナ酸化膜と電極を形成したダイヤモンド MOSFET の電气的特性の測定結果を示す。理想的な線形領域と飽和領域を有する MOSFET のドレイン電流-ドレイン電圧特性が得られた。また、得られた値は、従来のメタルマスクを介した選択成長によって形成されたソース、ドレイン領域を有する MOSFET と同等の結果が得られた。今後は、ドリフト層などの二重埋込構造にも挑戦し、ダイヤモンド独自のデバイス作製プロセスとして確立を目指す。

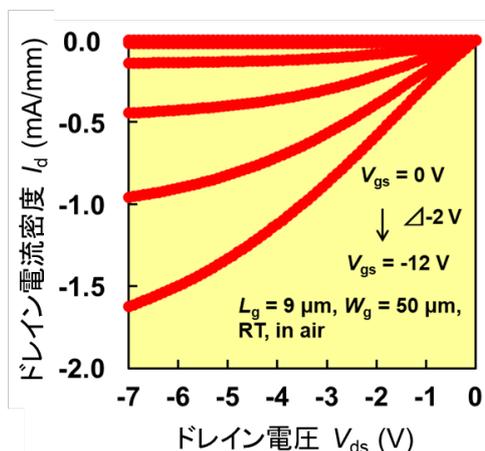


Fig. 3 Fig. 2 のプロセス後に、アルミナ酸化膜と電極を形成したダイヤモンド MOSFET の電气的特性の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kobayashi Kazuki, Zhang Xufang, Makino Toshiharu, Matsumoto Tsubasa, Inokuma Takao, Yamasaki Satoshi, Nebel Christoph E., Tokuda Norio	4. 巻 593
2. 論文標題 Selectively buried growth of heavily B doped diamond layers with step-free surfaces in N doped diamond (1 1 1) by homoepitaxial lateral growth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 153340 ~ 153340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2022.153340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsumoto Tsubasa, Yamakawa Tomoya, Kato Hiromitsu, Makino Toshiharu, Ogura Masahiko, Zhang Xufang, Inokuma Takao, Yamasaki Satoshi, Tokuda Norio	4. 巻 119
2. 論文標題 Fabrication of inversion p-channel MOSFET with a nitrogen-doped diamond body	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 242105 ~ 242105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0075964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 T. Kano, T. Matsumoto, X. Zhang, T. Inokuma, S. Yamasaki and N. Tokuda
2. 発表標題 Formation of Buried Heavily Doped Layers on Diamond (111) Surface by Solid Solution Reaction of Carbon into Nickel
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 X. Zhang, T. Matsumoto, M. Sometani, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, C.E. Nebel, T. Inokuma, S. Yamasaki, N. Tokuda
2. 発表標題 Impact of wet annealing treatments on Al ₂ O ₃ /diamond MOS interface
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kobayashi, X. Zhang, T. Matsumoto, T. Inokuma, S. Yamasaki, C.E. Nebel and N. Tokuda
2. 発表標題 Selectively buried growth of heavily B doped diamond layers in N doped diamond (111) with atomically flat surfaces
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 X. Zhang, T. Matsumoto, M. Sometani, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, C.E. Nebel, T. Inokuma, S. Yamasaki, N. Tokuda
2. 発表標題 Recent Progress in Electrical Characterization of Al2O3/Diamond Interface
3. 学会等名 14th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 解, 市川 公善, 林 寛, 小倉 政彦, 牧野 俊晴, 加藤 宙光, 竹内 大輔, 猪熊 孝夫, 山崎 聡, 徳田 規夫, 松本 翼
2. 発表標題 表面終端処理、酸化膜堆積の連続プロセスによるダイヤモンドMOSFETのヒステリシス低減
3. 学会等名 第70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 松本 翼, 佐藤 解, 中村 勇斗, Traore Aboulaye, 牧野 俊晴, 加藤 宙光, 小倉 政彦, 市川 公善, 林 寛, 猪熊 孝夫, 山崎 聡, 徳田 規夫
2. 発表標題 ダイヤモンドMOSFETにおけるドリフト抵抗フリー構造の提案
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsubasa Matsumoto, Tomoya Yamakawa, Xufang Zhang, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Daisuke Takeuchi, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, Norio Tokuda
2. 発表標題 Diamond MOSFET for Next-Generation Power Devices
3. 学会等名 3D PEIM'2021 symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山河 智哉, 松本翼, 猪熊 孝夫, 山崎 聡, 張 旭芳, 加藤宙光, 小倉政彦, 牧野俊晴, C.E.Nebel, 徳田 規夫
2. 発表標題 チャネル部追成長による反転層ダイヤモンドMOSFETの電気特性改善
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 松本翼, 村光希哉, 松島優希, 宮崎泰一, 林寛, 市川公善, 牧野俊晴, 猪熊孝夫, 山崎聡, 徳田規夫
2. 発表標題 n型ダイヤモンド半導体における不純物濃度と接触抵抗の関係
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tsubasa MATSUMOTO, Kai Sato, Yuto Nakamura, Traore Aboulaye, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Kimiyoshi Ichikawa, Kan Hayashi, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, Norio Tokuda
2. 発表標題 New structure of inversion channel diamond MOSFET for high power operation
3. 学会等名 Kanazawa Diamond Workshop 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tsubasa Matsumoto, Kai Sato, Yuto Nakamura, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Traore Aboulaye, Kimiyoshi Ichikawa, Kan Hayashi, Takako Inokuma, Satoshi Yamasaki, Norio Tokuda
2. 発表標題 Proposal of inversion channel diamond MOSFET with drift layer-free for low-loss and high-voltage
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop 2024 SBDD XXVIII (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shota Abe, Kai Sato, Yuki Matsushima, Kimiyoshi Ichikawa, Kan Hayashi, Satoshi Yamasaki, Takao Inokuma, Norio Tokuda, Tsubasa Matsumoto
2. 発表標題 Fabrication of Schottky-pn diodes using lightly nitrogen doped diamond film
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kai Sato, Kimiyoshi Ichikawa, Kan Hayashi, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, Norio Tokuda, Tsubasa Matsumoto
2. 発表標題 Evaluation of Contact Resistance of Diamond MOSFETs
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------