

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15042

研究課題名（和文）窒素ドーピング技術を用いた超低損失反転層ダイヤモンドMOSFETの開発

研究課題名（英文）Development of low-loss inversion channel diamond MOSFET using nitrogen doping

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンド半導体は、優れた物性を有しているが、新しい半導体であるがゆえに、デバイス応用は進んでいない。本研究では、世界に先駆けて実現した反転層チャンネルMOSFETにおいて低いチャンネル移動度の原因である界面準位やキャリア散乱を理解するため、ダイヤモンド中の不純物濃度や表面ラフネスがデバイス特性に与える影響を調査した。結果、MOSFETにおいては窒素の低濃度化に課題を残すものの、従来の移動度を2倍程度改善する50 cm<sup>2</sup>/Vsを実現した。また、ホウ素ドーピング型ダイヤモンド表面のラフネスを低減させることで、MOSキャパシタにおいて10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>/eV 台の低い界面準位密度を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって確立しつつある窒素ドーピング技術は、本研究対象とするMOSFET以外のパワーデバイスにおけるドリフト層や素子分離層の形成技術にとどまらず、量子デバイス応用が期待される窒素と空孔との複合欠陥であるNVセンタの精密形成のコア技術となると考えられる。今後も継続して研究していくことにより、SiCやGaNで実現できない高いチャンネル移動度を達成するだけでなく、すべてのダイヤモンドデバイスの性能向上に寄与したい。

研究成果の概要（英文）：Diamond has excellent physical properties. However, the device applications have not progressed because many physics that cannot be understood remain. In this study, we investigated the effects of impurity concentration and surface roughness in diamond on device characteristics to understand the interface states and carrier scattering that cause low field-effect mobility in the inversion channel MOSFET, which was realized for the first time in the world. As a result, we have achieved 50 cm<sup>2</sup>/Vs, which is about twice as good as the conventional mobility, although there is still an issue in reducing the nitrogen concentration in body of MOSFETs. In addition, by reducing the surface roughness of the boron-doped p-type diamond, a low interface state density of less than 10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>/eV was achieved in the MOS capacitors.

研究分野：電子工学

キーワード：ダイヤモンド MOSFET パワーデバイス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

省エネルギー技術戦略 2016 では、パワーデバイスによる徹底した省エネ社会の構築が重要技術戦略の一つに掲げられている。ダイヤモンドは、Baliga (パワーデバイス性能) 指数や省エネ効果が極めて高く、パワーデバイス材料として期待されている。

パワーデバイスの主流は MOSFET であるが、ダイヤモンドでは実現していなかった。申請者が世界に先駆け、低濃度リンドープ n 型ダイヤモンドの成膜技術とダイヤモンド表面を OH (水酸基) 終端するウェットアニール処理技術を使うことにより、反転層ダイヤモンド MOSFET の作製、動作に成功した。しかしながら、理想的な絶縁膜堆積に寄与するポストウェットアニール処理によって改善したデバイス構造においても、チャンネル移動度は  $31 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  と依然として低く、低いチャンネル移動度の起源となる要因を理解することが必要であった。

### 2. 研究の目的

反転層ダイヤモンド MOSFET の低いチャンネル移動度の原因を明らかにし、パワーデバイス実用が進む SiC のチャンネル移動度  $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を超えることが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

低窒素濃度における平坦化成長技術の確立においては、水素ガス精製器によるガス中不純物の低減とターボ分子ポンプによるチャンパー内残留不純物の低減を行うことで窒素濃度の低減を図った。また、n 型ダイヤモンドを確保するため、窒素が他の不純物よりも多い条件下で平坦化成長を試みた。

チャンネル移動度の窒素濃度依存に関しては、窒素濃度の低減が順調に進まなかったため、同じリン濃度と組み合わせ、チャンネル移動度のドナー濃度依存として調査した。

界面準位密度の表面ラフネス依存に関しては、ダイヤモンド MOS キャパシタを作製する際に水素プラズマ処理による表面平坦化や熱混酸処理による表面の原子的なラフ化を用いて、それらのデバイス特性を評価した。また、表面平坦化が実現していないヘテロダイヤモンドを用いた MOSFET を作製し、そのデバイス特性を評価した。

### 4. 研究成果

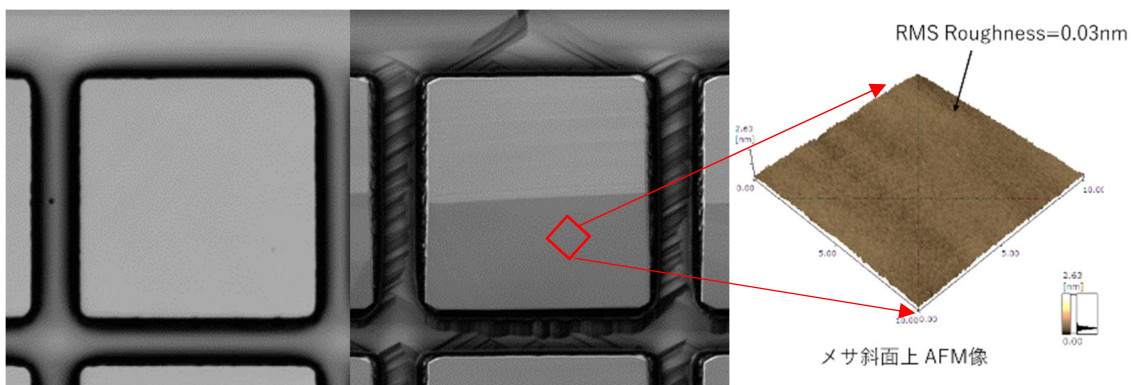


図 1.  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の窒素ドープ条件下で作製した原子の平坦面、左が成長前、中央が成長後、右が中央画像に形成された斜面を AFM によって観察した画像

図 1 に、 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の窒素ドープ条件下で作製した原子の平坦面を示す。四角い領域がダイヤモンド上に形成した島状の構造であり、その下部から成長した斜面が観察された。この斜面を AFM 観察すると、RMS 値が  $0.03 \text{ nm}$  と原子ステップより小さく、ノイズレベルであることから、原子的平坦面が窒素ドープ膜でも形成することに成功した。

図 2 に、反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET におけるチャンネル移動度のドナー濃度依存を示す。比較のため、低電圧領域のチャンネル移動度を比較した。ドナー濃度を低減すると、移動度が増加していくことが明らかとなった。また、窒素ドープの方が高いドナー濃度にも関わらず、やや高いチャンネル移動度を示す傾向がみられた。このときの表面ラフネスを評価すると、ドナー濃度の低減にともな

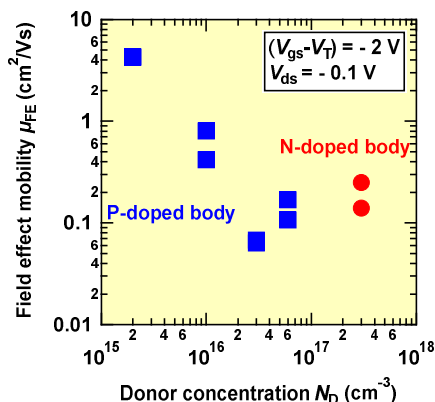


図 2. チャンネル移動度のドナー濃度依存

い表面ラフネスが低減しており、その効果としてチャネル移動度が増加していると考えられる。

図 3 に酸化膜堆積前の処理として水素プラズマ処理有無によるチャネル移動度と界面準位密度の変化を示す。水素プラズマ処理を導入することで、MOSFET においてはチャネル移動度を 100 倍に増加させ、界面準位密度を一桁以上低減することに成功した。界面準位密度は  $10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$  台の低い値を達成した。

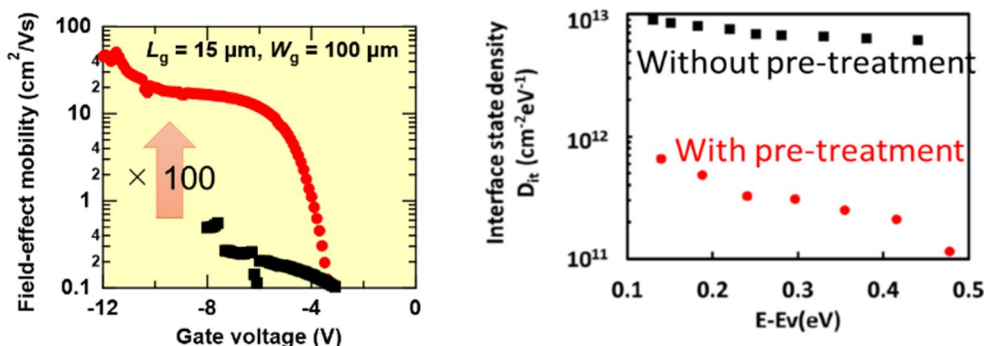


図 3. 水素プラズマ処理によって表面を平坦化したチャネル移動度(左)と界面準位密度(右) 比較として熱混酸により原子的にラフ化した表面の特性を黒で示す。

図 4 に荒れた表面を有するヘテロエピタキシャルダイヤモンド MOSFET と平坦面を有するホモエピタキシャルダイヤモンド MOSFET におけるチャネル移動度と界面準位密度の関係を示す。界面準位密度に大きな差は見られなかったが、RMS 値が一桁以上大きいヘテロエピタキシャルダイヤモンド MOSFET においては、チャネル移動度が一桁程度低い傾向があることが分かった。図 5 にチャネル移動度と界面準位密度の関係を示す。同じ絶縁体とダイヤモンド半導体界面を有する H 終端 MOSFET において、800 cm<sup>2</sup>/Vs 近いチャネル移動度が達成されており、MOS キャパシタにおいて同等以上の界面準位密度が達成されているため、MOSFET に平坦面を組み込むことで、目標を遥かに超えるチャネル移動度を達成できる可能性を示した。

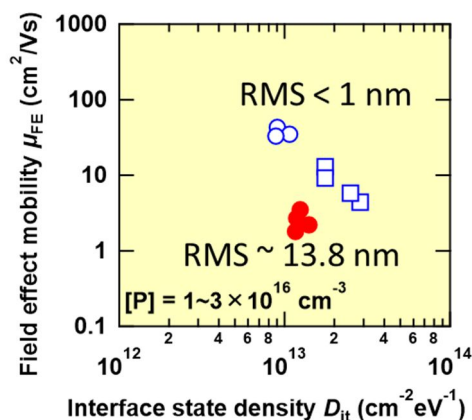


図 4. 荒れた表面を有するヘテロエピタキシャルダイヤモンド MOSFET (赤) と平坦面を有するホモエピタキシャルダイヤモンド MOSFET(青)におけるチャネル移動度と界面準位密度の関係

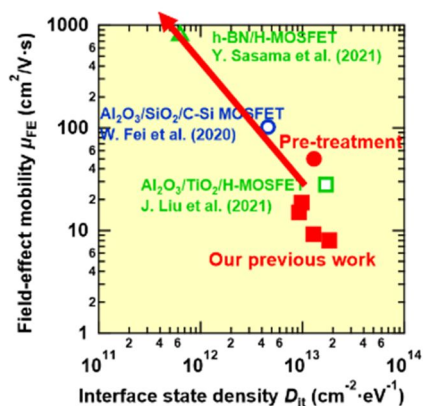


図 5. チャネル移動度と界面準位密度の関係、将来性を示すため、H 終端ダイヤモンド MOSFET の結果も記載

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 5件）

1. 著者名 Matsumoto Tsubasa, Kato Hiromitsu, Makino Toshiharu, Ogura Masahiko, Takeuchi Daisuke, Yamasaki Satoshi, Inokuma Takao, Tokuda Norio	4. 巻 114
2. 論文標題 Inversion channel mobility and interface state density of diamond MOSFET using N-type body with various phosphorus concentrations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 242101 ~ 242101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5100328	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 -

1. 著者名 Zhang Xufang, Matsumoto Tsubasa, Sakurai Ukyo, Makino Toshiharu, Ogura Masahiko, Yamasaki Satoshi, Sometani Mitsuru, Okamoto Dai, Yano Hiroshi, Iwamuro Noriyuki, Inokuma Takao, Tokuda Norio	4. 巻 168
2. 論文標題 Energy distribution of Al2O3/diamond interface states characterized by high temperature capacitance-voltage method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 659 ~ 664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.07.019	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 -

1. 著者名 Zhang Xufang, Matsumoto Tsubasa, Sakurai Ukyo, Makino Toshiharu, Ogura Masahiko, Sometani Mitsuru, Yamasaki Satoshi, Nebel Christoph E., Inokuma Takao, Tokuda Norio	4. 巻 117
2. 論文標題 Insight into Al2O3/B-doped diamond interface states with high-temperature conductance method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092104 ~ 092104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0021785	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 -

1. 著者名 Zhang Xufang, Matsumoto Tsubasa, Nakano Yuta, Noguchi Hitoshi, Kato Hiromitsu, Makino Toshiharu, Takeuchi Daisuke, Ogura Masahiko, Yamasaki Satoshi, Nebel Christoph E., Inokuma Takao, Tokuda Norio	4. 巻 175
2. 論文標題 Inversion channel MOSFET on heteroepitaxially grown free-standing diamond	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 615 ~ 619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.11.072	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 -

1. 著者名 Sakauchi Kazuto, Nagai Masatsugu, Tabakoya Taira, Nakamura Yuto, Yamasaki Satoshi, Nebel Christoph E., Zhang Xufang, Matsumoto Tsubasa, Inokuma Takao, Tokuda Norio	4. 巻 116
2. 論文標題 Mechanical damage-free surface planarization of single-crystal diamond based on carbon solid solution into nickel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 108390 ~ 108390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2021.108390	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4件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 T. Matsumoto, U. Sakurai, T. Yamakawa, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, D. Takeuchi, S. Yamasaki, T. Inokuma, N. Tokuda,
2. 発表標題 Recent progress for inversion channel mobility improvement in diamond MOSFETs
3. 学会等名 The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 翼、桜井 海匡、加藤 宙光、牧野 俊晴、小倉 政彦、竹内 大輔、山崎 聡、猪熊 孝夫、徳田 規夫
2. 発表標題 ダイヤモンドデバイスとMOS界面の現状
3. 学会等名 第25回電子デバイス界面テクノロジー研究会 - 材料・プロセス・デバイス特性の物理 - (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 翼、桜井 海匡、山河 智哉、加藤 宙光、牧野 俊晴、小倉 政彦、竹内 大輔、猪熊 孝夫、山崎 聡、徳田 規夫
2. 発表標題 窒素ドーパドを用いた反転層ダイヤモンドMOSFETの特性
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桜井 海匡, 松本 翼, 長井 雅嗣, 加藤 宙光, 牧野 俊晴, 小倉 政彦, 竹内 大輔, 山崎 聡, 猪熊 孝夫, C. E. Nebel, 徳田 規夫
2. 発表標題 水素プラズマ処理導入によるダイヤモンド(111)MOS構造の界面準位密度低減とMOSFETのチャネル移動度向上
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019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
---------	---------