

令和7年2月17日

各報道機関文教担当記者 様

世界初！完全原子的平坦ダイヤモンド表面を MOS 界面に用いたダイヤモンド MOSFET の作製に成功

金沢大学ナノマテリアル研究所の徳田規夫教授、自然科学研究科電子情報科学専攻博士後期課程／卓越大学院の小林和樹らの研究グループは、産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センターの牧野俊晴研究チーム長、ドイツ Diamond and Carbon Applications のクリストフ E. ネーベル CEO（本学招へい教授）との共同研究により、**世界で初めて完全に平坦なダイヤモンド表面を MOS 界面（※1）に有するダイヤモンド MOSFET（※2）を作製することに成功しました。**

カーボンニュートラル実現のための一つ的手段として、ワイドバンドギャップ半導体を用いた高効率な電力制御が可能な次世代パワーデバイスが期待されています。その中でも、特に高い絶縁破壊電界とキャリア移動度、熱伝導率を有するダイヤモンドは、究極の半導体デバイス材料として期待されています。

徳田教授らの研究グループは、これまで独自のダイヤモンド成長技術や表面・界面制御技術を開発し、世界で初めてダイヤモンド半導体を用いた反転層チャネル型 MOSFET の開発に成功しました。しかし、開発したダイヤモンド MOSFET は、MOS 界面にチャネルの散乱因子が多く存在し、動作時の高い抵抗が問題でした。そのため、その散乱因子の解明と低減に向けた研究が進められています。本研究グループは、ダイヤモンド MOS 界面の荒れがその散乱因子の原因の一つであることを突き止め、原子的に完全に平坦なダイヤモンド表面を MOS 界面に用いることでデバイスの低抵抗化を目指してきました。その結果、2022 年に開発した、完全平坦表面を持つダイヤモンド半導体層の選択的埋込成長技術を利用し、世界で初めて完全原子的平坦ダイヤモンド表面を MOS 界面に有するダイヤモンド MOSFET を作製することに成功しました。本デバイス作製技術は、ダイヤモンド MOSFET の性能向上に大きく寄与しました。

今後、本技術を発展させ、更なる性能向上により、ダイヤモンド半導体の実用化を大きく前進させることが期待できます。

研究成果は、2025 年 1 月 28 日に Elsevier の国際学術誌『Carbon』のオンライン版に先行掲載されました。

【研究の背景】

カーボンニュートラルを実現するためのキーテクノロジーの一つとして、大幅な省エネを実現する次世代パワー半導体の研究開発が進められています。特にダイヤモンドは、次世代半導体材料の中でも、高い絶縁破壊電界や熱伝導率を有しており、より大きな電力の制御が必要な領域や、放射線環境下、高温環境下、宇宙環境下といった過酷環境下での応用領域における省エネ化や安全性・信頼性に優れた動作につながると期待されています。半導体デバイスにおいて、反転層 MOSFET はノーマリーオフ動作（※3）を有し、パワーデバイスやロジックデバイス、イメージセンサ等に用いられている基盤デバイス構造であり、最も重要な半導体デバイスの一つです。本研究グループでは、独自のダイヤモンド成長技術、不純物ドーピング制御技術、表面・界面制御技術を開発し、2016年に世界で初めてダイヤモンド半導体を用いた反転層チャンネル型 MOSFET の動作実証に成功しました。

しかし、当時開発した反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET は、MOS 界面にチャンネルの散乱因子が多く存在し、動作時の抵抗が高いという問題がありました。そのような背景から、徳田らの研究グループは、MOSFET 動作時の抵抗を左右するチャンネル部分の酸化膜/ダイヤモンド界面において、構造の不完全性がその散乱因子の原因の一つであることを突き止めており、原子的に平坦なダイヤモンド表面を MOS 界面に用いることが一つの解決策になると考えられています。

【研究成果の概要】

上記のような背景から、本研究グループでは、2022年に開発した、完全平坦表面を持つダイヤモンド半導体層の選択的埋込成長技術を利用し、世界で初めて完全に原子なダイヤモンド表面を MOS 界面に有する反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET を作製することに成功しました。図1は、作製したデバイスの概略図と光学顕微鏡像です。図3には界面の Bright-Field Scanning TEM 像（※4）を示しており、サブマイクロスケールでの原子的平坦界面を実現できていることを示しています。

作製したデバイスは、ノーマリーオフ動作、ゲート電圧制御と基本的な反転層チャンネル MOSFET の特性を示しました。図2には、2016年に作製した MOSFET と本研究にて作製した MOSFET の同一ゲート電圧印加時のドレイン電流密度 (I_d) - ドレイン電圧 (V_{ds}) 特性を比較したグラフを示しています。このグラフから、本研究にて新しく開発した MOSFET の I_d は、2016年に作製した MOSFET の I_d と比較して、12.5倍に向上しており、低抵抗化に成功していることが分かります。以上のことから、本デバイス作製技術は、ダイヤモンド MOSFET の性能向上に大きく寄与することを実証しました。

【今後の展開】

本研究により、原子的平坦面をデバイス界面に使用するプロセスを開発したことは、今後のダイヤモンドデバイスの開発に大きく貢献したと考えられます。今後は更なるプロセスの高度化を行いダイヤモンド半導体デバイスの高性能化を実現し、ダイヤモンド半導体の社会実装を目指します。

本研究は、金沢大学超然プロジェクト 2022、地域中核・特色ある研究大学強化促進事業 (J-PEAKS)、日本学術振興会科研費 (科研費番号 18KK0383)、JST 創発的研究支援事業 (助成番号 JPMJFR2035307)、文部科学省の金沢大学卓越大学院プログラムの支援を受けて実施されました。

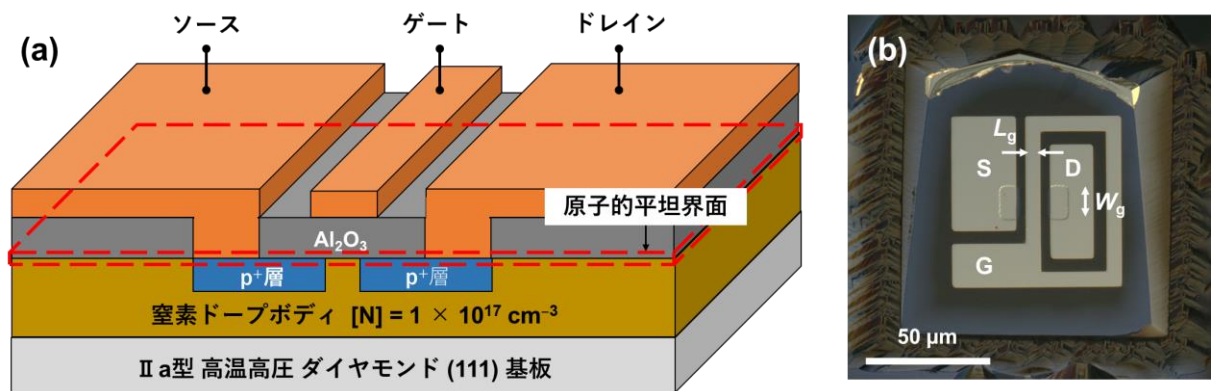


図 1. 今回開発した原子的平坦界面を有する反転層チャネルダイヤモンド MOSFET の (a) 模式図と、(b) 光学顕微鏡像。

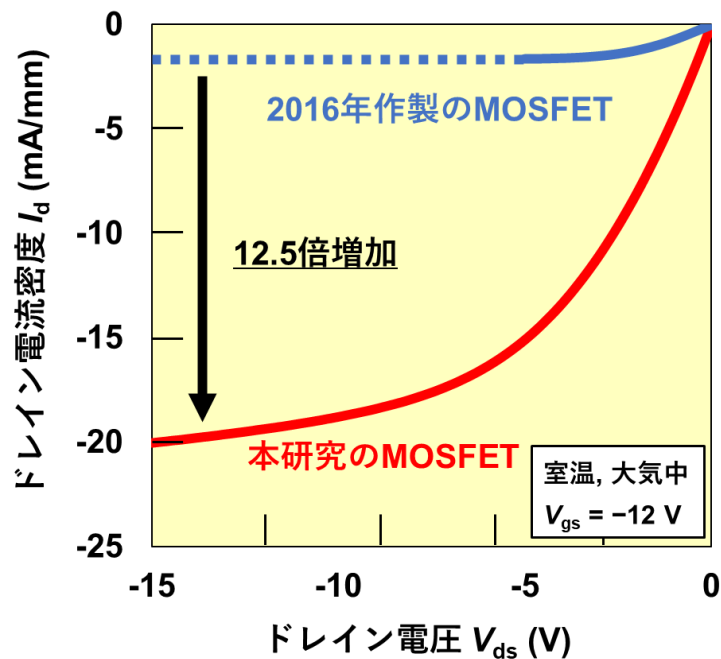


図 2. 2016年に作製した MOSFET と本研究で作製した MOSFET の、ドレイン電流密度 (I_d) -ドレイン電圧 (V_{ds}) 特性。なお、実線は測定値であり、点線は推測値である。

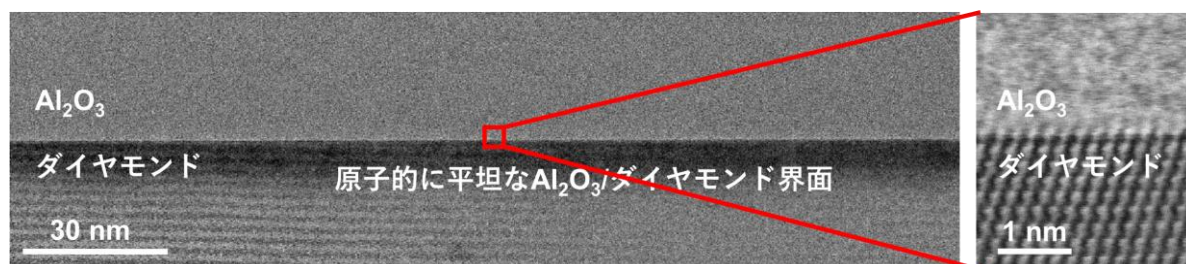


図 3. 原子的に平坦な Al_2O_3 /ダイヤモンド (111) 界面の Bright-Field Scanning TEM 像

【掲載論文】

雑誌名 : *Carbon*

論文名 : Fabrication of inversion channel diamond MOSFET with atomically step-free Al_2O_3 /diamond interface

(原子的に平坦な Al_2O_3 /ダイヤモンド界面を有する反転層チャンネルダイヤモンド MOSFET の作製)

著者名 : Kazuki Kobayashi, Kai Sato, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Toshiharu Makino, Tsubasa Matsumoto, Kimiyoshi Ichikawa, Kan Hayashi, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, Christoph E. Nebel, and Norio Tokuda

(小林 和樹、佐藤 解、加藤 宙光、小倉 政彦、牧野 俊晴、松本 翼、市川 公善、林 寛、猪熊 孝夫、山崎 聡、Christoph E. Nebel、徳田 規夫)

掲載日時 : 2025 年 1 月 28 日にオンライン版に掲載

DOI : 10.1016/j.carbon.2025.120024

URL : <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120024>

【用語解説】

※1 MOS 界面

MOS は Metal Oxide Semiconductor の略称で、酸化膜と半導体の界面のことである。MOSFET のチャンネルを形成する箇所となり、MOS 界面の完全性で決定される。

※2 MOSFET

MOSFET は Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor の略称で、金属と酸化膜、半導体からなる界面を有する電界効果トランジスタのことである。

現在普及している半導体デバイスの多くが反転層チャンネル MOSFET を基本構造としている。

※3 ノーマリーオフ動作

半導体デバイスの動作モードの一種。MOSFET では、ゲート部分に電圧を印可しない限りソース・ドレイン間で導通せずオフの状態にある特性を指す。消費電力を抑えることや、デバイスが壊れた際の安全な停止が可能となる。

※4 Bright-Field Scanning TEM 像

透過型電子顕微鏡 (TEM) の観察手法の一つで、明視野 (bright-field) 条件下で試料の構造や組成を可視化する技術。原子スケールの構造観察が可能。

【本件に関するお問い合わせ先】

■研究内容に関すること

金沢大学ナノマテリアル研究所 教授

徳田 規夫 (とくだ のりお)

TEL : 076-264-5024

E-mail : tokuda@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

■広報に関すること

金沢大学理工系事務部総務課総務係

居村 麻美 (いむら あさみ)

TEL : 076-234-6826

E-mail : s-somu @adm.kanazawa-u.ac.jp