

令和8年10月2日

各報道機関文教担当記者 様

原子層レベルで制御する ダイヤモンドエッチング技術を開発 ～ダイヤモンド半導体・量子デバイスの実現に貢献～

金沢大学ダイヤモンド研究センターの林寛助教、徳田規夫センター長／教授、大学院自然科学研究科電子情報通信学専攻博士前期課程2年の吉田利紅らの研究グループは、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）らとの共同研究により、**ダイヤモンドの原子的平坦面(※1)に対して平坦性を維持したまま、エッチング深さをナノメートルスケールで制御できる選択的エッチング(※2)技術の開発に成功**しました。

本研究は、優れた物性を有するダイヤモンドを次世代の半導体デバイスや量子デバイスへ応用する上で重要となる、微細なトレンチ構造(※3)の形成技術に関するものです。ダイヤモンドは、非常に高い熱伝導率や絶縁破壊電界など、他の半導体材料をしのぐ優れた物性を有することから、「究極の半導体材料」として期待されています。一方で、ダイヤモンドは化学的に非常に安定な材料であるため、デバイス作製に必要となる微細なトレンチ構造を高精度に形成することは、容易ではありませんでした。特にダイヤモンド(111)面は、原子レベルで平坦な表面を形成できるという大きな利点を持つ一方で、その平坦性を維持したまま深さ方向にエッチングすることが難しく、トレンチ形成における重要な課題となっていました。

そこで本研究グループは、窒素を添加した水素プラズマ(※4)を用いた新たなエッチング手法を開発しました。その結果、ダイヤモンド(111)の原子的に平坦な表面を維持しながら、ナノメートルスケールでエッチング深さを制御できることを実証しました。これは、単にダイヤモンドを深くエッチングするだけでなく、「原子的に平坦な表面を維持しながら、必要な深さまで加工する」という、ダイヤモンドデバイスの微細加工に重要な技術を実現したものです。

本研究成果により、これまで困難であった原子的に平坦なダイヤモンド(111)面への高精度なトレンチ形成が可能となり、**今後の高性能・低消費電力ダイヤモンド半導体デバイスや高感度量子センサ、量子コンピュータの実現に向けた重要な基盤技術となることが期待されます**。また、エッチング深さや表面形状を自在に制御できることから、さまざまなダイヤモンドデバイス構造への応用も期待されます。

本研究成果は2026年9月12日に国際雑誌『Carbon』のオンライン版に掲載、9月16日に正式掲載されました。

【研究の背景】

次世代のエネルギー・センシング技術の実現に向けて、高性能な半導体デバイスと高感度な計測技術の開発が求められています。

ダイヤモンドは、非常に高い絶縁破壊電界、優れたキャリア移動度、極めて高い熱伝導率を有することから、電力損失の少ない次世代パワーデバイス用の半導体材料として期待されています。また、ダイヤモンド中の NV センターは、磁場や温度などを高感度に計測できる量子センサとして注目されています。このようにダイヤモンドは、優れた半導体特性と量子センシング機能を併せ持つ特徴的な材料です。中でも、原子的に平坦なダイヤモンド(111)表面は、反転層型ダイヤモンド MOSFET (※5)において、界面のわずかな凹凸（界面ラフネス）によって生じる電子の流れの乱れ（キャリア散乱）を抑えることができるため、デバイスの高性能化に有効と考えられています。また、表面近傍の NV センターを利用した高感度量子イメージングへの応用も期待されます。こうしたダイヤモンド(111)表面の優れた特性をデバイス応用に生かすためには、トレンチなどの微細構造を高精度に形成する加工技術が不可欠です。しかし、ダイヤモンド(111)面は化学的に非常に安定であるため、こうした微細加工は容易ではありません。

本研究グループはこれまで、窒素を添加した水素プラズマにより、ダイヤモンド表面を深さ方向にエッチングしながら原子的に平坦な表面を形成できる可能性を示してきました。しかし、従来研究では機械研磨された基板を用いていたため、研磨によって生じた表面欠陥や加工ダメージ層がエッチング挙動に及ぼす影響を排除できず、エッチングメカニズムは十分に明らかになっていませんでした。

そこで本研究では、機械研磨によるダメージ層を含まない原子的に平坦なダイヤモンド(111)表面を対象とし、窒素添加水素プラズマによるエッチング挙動を評価しました。さらに、エッチング深さや表面形態、表面平坦性を詳細に解析することで、エッチングメカニズムを明らかにするとともに、原子的平坦性を維持したトレンチ形成技術への応用可能性を検討しました。

【研究成果の概要】

本研究では、原子的に平坦なダイヤモンド(111)表面に Ti/Au メタルマスクを形成し、窒素添加水素 ($\text{H}_2 + \text{N}_2$) プラズマによる選択的エッチングを行いました (図 1)。その結果、原子的平坦性を維持したまま、ナノメートルスケールでエッチング深さを制御できることを明らかにしました (図 2)。

また、エッチング後の底面を原子間力顕微鏡 (AFM) (※6) で観察した結果、原子層に対応する段差やピット構造を確認しました。これらの解析結果から、横方向エッチングと縦方向エッチングが組み合わさり、原子層を一層ずつ取り除くように加工が進む layer-by-layer 型のエッチング機構を提案しました。本成果は、原子的に平坦なダイヤモンド(111)面への高精度なトレンチ形成技術につながるものです。

【今後の展開】

本研究成果により、これまで困難であったダイヤモンド(111)表面の微細加工を、原子的に平坦な状態を維持したまま実現できる可能性が示されました。今後は、本技術をダイヤモンド半導体デバイスの作製に応用し、原子的に平坦な界面を有するデバイス構造の最適化を進めることで、さらなる低損失化と高性能化を目指します。

将来的には、電気自動車（EV）や電力網などの高効率な電力変換が求められる分野への応用を通じて、電力損失の低減と省エネルギー化を実現し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献することが期待されます。

本研究の一部は、日本学術振興会（JSPS）「地域中核・特色ある研究大学強化促進事業（J-PEAKS）」（課題番号：JPJS00420230006）、科学技術振興機構（JST）「FOREST プログラム」（課題番号：JPMJFR20353078）、JSPS 科研費（課題番号：JP24K01344）、ならびに株式会社ダイセルからの寄附により設置された金沢大学未来内視鏡イノベーション寄附講座の支援を受けて実施されました。

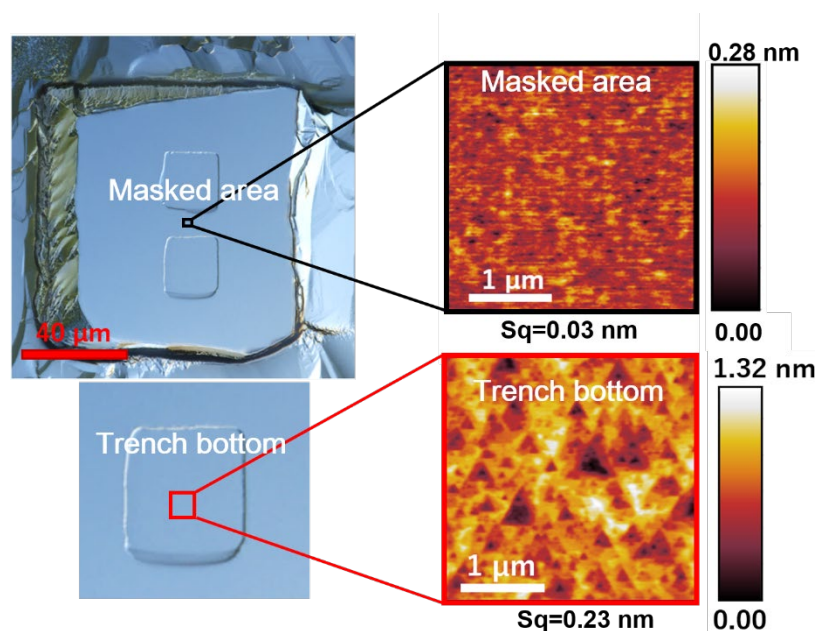


図 1. H_2+N_2 プラズマエッチング後のメタルマスク除去後の LM 像と AFM 像

R. Yoshida et al., *Carbon* (2026), CC BY 4.0 に基づき改変

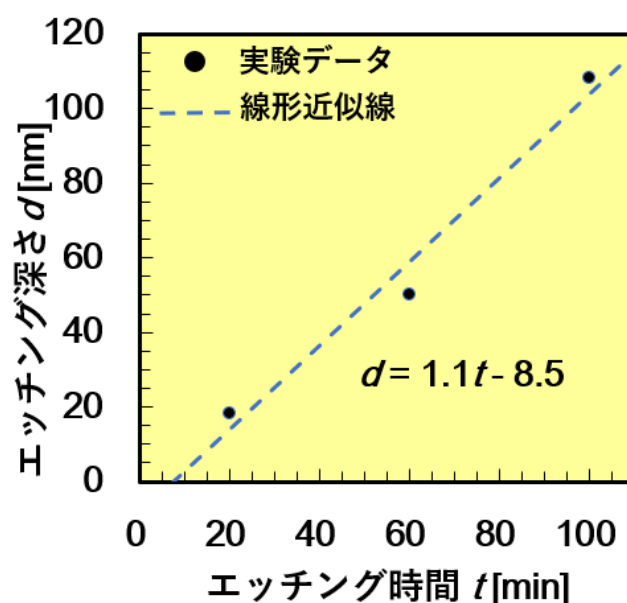


図 2. エッチング時間に対するエッチング深さ

R. Yoshida et al., *Carbon* (2026), CC BY 4.0 に基づき改変

【掲載論文】

雑誌名 : *Carbon*

論文名 : Selective etching of atomically flat diamond (111) surfaces using H_2+N_2 plasma etching
(H_2+N_2 プラズマエッチングを用いたダイヤモンド(111)原子的平坦面への選択エッチング)

著者名 : Riku Yoshida, Yuto Nakamura, Madoka Katayama, Kazuki Kobayashi, Kimiyoshi Ichikawa, Taro Yoshikawa, Tsubasa Matsumoto, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, C.E. Nebel, Kan Hayashi, Norio Tokuda

(吉田利紅、中村 勇斗、片山まどか、小林 和樹、市川 公善、吉川太郎、松本 翼、猪熊 孝夫、山崎 聡、クリストフ E. ネーベル、林 寛、徳田 規夫)

掲載日時 : 2026 年 9 月 16 日に掲載

DOI : 10.1016/j.carbon.2026.122099

URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622326008730>

【用語解説】

※1 原子的平坦面

原子レベルで表面の凹凸が極めて小さく、平坦に整ったダイヤモンド表面である。本研究では、ダイヤモンド(111)面において原子層に対応する平坦な表面を対象としている。

※2 エッチング

材料の表面を化学反応などによって削り、目的の形状に加工する技術である。半導体デバイスの微細構造形成に広く用いられている。

※3 トレンチ構造

半導体表面に形成された溝状の構造である。電極や絶縁膜などを組み合わせることで、半導体デバイスの立体的な構造を形成するために利用される。

※4 プラズマ

気体にエネルギーを与えることで生成される、電子やイオンなどの荷電粒子を含む状態である。本研究では、水素と窒素からなるプラズマを利用してダイヤモンドを加工している。

※5 MOSFET

ゲート電極に電圧を加えることで、半導体中を流れる電流を制御するトランジスタである。現在の電子機器や電力変換機器に広く利用されている。

※6 原子間力顕微鏡 (AFM)

探針を試料表面に近づけ、その間に働く原子レベルの力を測定することで、表面形状を観察する顕微鏡である。ナノメートル以下の微細な表面凹凸を観察することができる。

【本件に関するお問い合わせ先】

■ 研究内容に関すること

金沢大学ダイヤモンド研究センター 助教

林 寛（はやし かん）

TEL : 076-234-4853

E-mail : kan-hayashi@se.kanazawa-u.ac.jp

金沢大学ダイヤモンド研究センター センター長／教授

徳田 規夫（とくだ のりお）

TEL : 076-234-4875

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

■ 広報担当

金沢大学理工系事務部総務課総務係

割出 智美（わりだし ともみ）

TEL : 076-234-6957

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