



ダイヤモンドで高移動度トランジスタを実現

～必須と考えられてきたアクセプタはむしろ邪魔？ 従来と逆の発想で高特性能化～

配布日時：2022年1月18日14時

国立研究開発法人物質・材料研究機構

国立大学法人筑波大学

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS) は、ダイヤモンド電界効果トランジスタを新しい設計指針に基づいて作製し、高い正孔移動度 (低損失・高速動作のために重要) とノーマリオフ動作 (ゲート電圧をかけないときに電流が流れない動作; 安全の観点から重要) を示すことを実証しました。本成果は、低損失の電力変換や高速情報通信に資する素子の実現につながると期待されます。

2. ダイヤモンドは、ワイドバンドギャップ半導体として優れた特性を持ち、パワーエレクトロニクスや情報通信用途での利用が期待されています。すでに実用化されている炭化シリコン(SiC)や窒化ガリウム(GaN)に比べてもバンドギャップが大きく、より高電圧・高温・高速・低損失で動作する素子を作れる可能性があります。これまでに特に、水素終端ダイヤモンド (表面の炭素が水素と結合したダイヤモンド) を使った電界効果トランジスタについて、多くの研究開発が行われてきました。しかしトランジスタ構造にすると、移動度 (電流を担う正孔の動きやすさを表す指標) が本来の 1/10~1/100 に低下するなど、ダイヤモンドの優れた特性を十分活かすことができていませんでした。

3. NIMS の研究チームは、従来主に使われてきたアルミナなどの酸化物の代わりに六方晶窒化ホウ素をゲート絶縁体として使うとともに、水素終端ダイヤモンド表面を大気に晒さない新しい作製手法を用いることで、高性能なトランジスタの開発に成功しました。オン状態 (正孔の密度が高い時) の移動度は、酸化物などのゲート絶縁体を使った一般的な手法に比べて5倍以上に向上しました。高い移動度は、抵抗を下げて損失を低減し、素子の高速化や小型化にも適します。同時に、パワーエレクトロニクスで安全性の観点から重要となるノーマリオフ動作も実現しました。この成功の鍵として、水素終端ダイヤモンドに電気伝導性を生じさせるために必要不可欠だと考えられてきたアクセプタ(電子を受け取るもの)を取り除くという従来とは逆の発想に基づく素子構造を、上記作製手法によって実現できたことが挙げられます。

4. 本成果は、今後のダイヤモンドトランジスタ開発の新しい指針を提供するもので、パワーエレクトロニクスや情報通信の分野で利用できる高性能な素子の実現につながると期待されます。今後は、さらなる特性向上を追究するとともに、より実用に適したダイヤモンドトランジスタの開発を目指します。

5. 本研究は、NIMS の笹間陽介、蔭浦泰資、井村将隆、渡邊賢司、谷口尚、内橋隆、山口尚秀 (筑波大学 数理物質系 (連携大学院) 兼務) からなる研究チームによって行われました。また、本研究は科研費基盤研究 B 「h-BN ヘテロ構造を利用した高移動度ダイヤモンド FET の創製と量子輸送現象の開拓」(19H02605)などの一環として行われました。

6. 本研究成果は、Nature Electronics 誌に 2021 年 12 月 23 日にオンライン掲載 (<https://doi.org/10.1038/s41928-021-00689-4>)されました。

研究の背景

ダイヤモンドは、すでに実用化されている SiC や GaN に比べて大きなバンドギャップを持ち、ワイドバンドギャップ半導体¹として優れた特性を有します。そのため、高電圧・高温・高速・低損失動作が可能な素子の材料として有望であり、次世代パワーエレクトロニクスや高速情報通信分野での応用が期待されています。特に、正孔の動きやすさを示す移動度が室温で $2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 以上と他のワイドバンドギャップ半導体に比べて1桁以上高く、実現が困難だった高特性のワイドバンドギャップ p チャンネル電界効果トランジスタ²を作れる可能性があります。

このため、ダイヤモンドを使った電界効果トランジスタの研究が精力的に行われてきました。特に、p 型の半導体特性を容易に得ることができる水素終端ダイヤモンド³を使って、多くの研究開発が行われてきました。しかし、トランジスタ構造にすると正孔の移動度⁴が低下し、ダイヤモンド本来の値の 1/10~1/100 程度にしかならないという問題がありました。また、多くの場合、安全の観点から望ましいノーマリオフ⁵動作ではなく、ノーマリオン動作を示しました。ノーマリオン動作にするためには、水素終端を部分的に壊すなど、さらに移動度を下げる要因となる特殊な手法が必要でした。

研究内容と成果

研究チームは、従来主に使われてきたアルミナなどの酸化物の代わりに六方晶窒化ホウ素をトランジスタのゲート絶縁体として使うとともに、水素終端ダイヤモンド表面を大気に晒さない新しい作製手法(図1)を用いることで、従来に比べて優れた特性を示すダイヤモンドトランジスタの開発に成功しました。六方晶窒化ホウ素としては、高温高压合成した単結晶を劈開して薄片化したものを、ダイヤモンドに貼り合わせて用いました。

作製したトランジスタのオン状態(正孔の密度が高いとき)の正孔の室温移動度は $680 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (図2(a),(b))に達しました。これは酸化物などのゲート絶縁体を使った一般的な手法に比べて5倍以上の値です(図3(a))。高い移動度は、抵抗を下げて損失を低減するとともに、素子の高速化や小型化に適します。同時に、安全性の観点から重要となるノーマリオン動作も実現しました。(図2(b),(c)) 高い移動度に伴って、これまでに報告されたなかで最高のチャンネル伝導度(シート抵抗に換算して $1.4 \text{ k}\Omega$) や最高の規格化電流密度 ($1600 \mu\text{m mA mm}^{-1}$) も得られました。(図3(b)) これらは、ダイヤモンドのみならずワイドバンドギャップ半導体の p チャンネル電界効果トランジスタの中でも特に優れた特性です。(図3(a),(b))

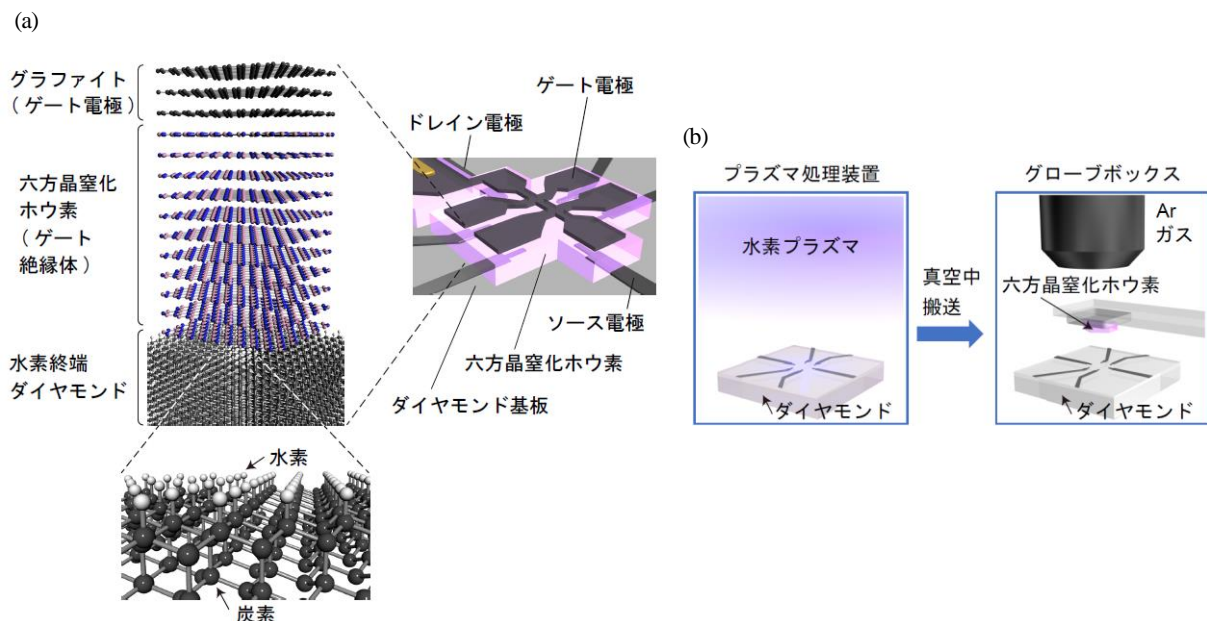


図1 (a) 本研究で作製したダイヤモンド電界効果トランジスタの構造。正孔の密度と移動度を正確に評価するために、ゲート電圧をかけながらホール(Hall)効果の測定が可能な構造にしました。(b) ダイヤモンド表面を水素プラズマに晒して水素終端化したあと、大気に晒さず Ar で満たされたグローブボックスに搬入し、そのなかで劈開した六方晶窒化ホウ素単結晶薄片を貼り付けることで、アクセプタとして働く大気由来の吸着物を低減しました。

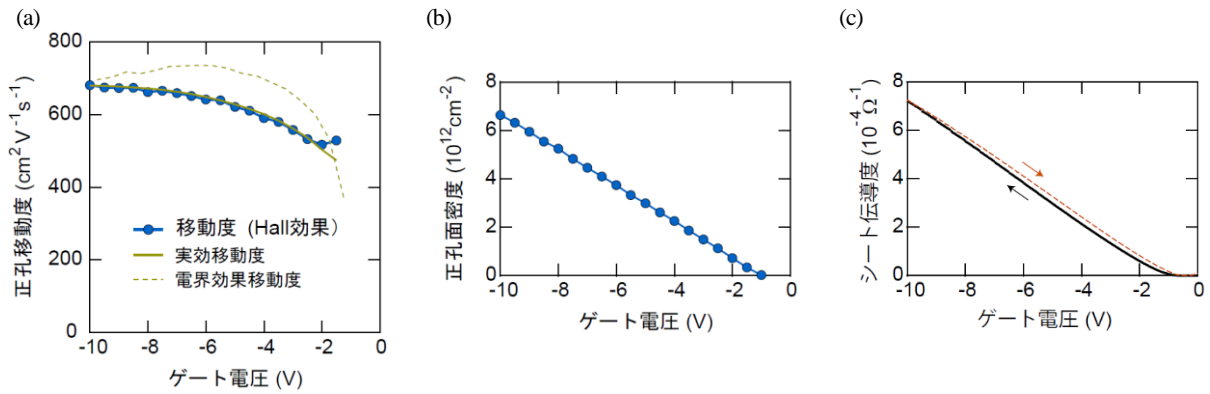


図2(a,b,c) 本研究で作製したダイヤモンド電界効果トランジスタのチャンネルの室温での正孔移動度 (a)、正孔面密度 (b)、シート伝導度 (シート抵抗の逆数) (c)のゲート電圧依存性 (aとbはホール(Hall)効果測定によって評価)。

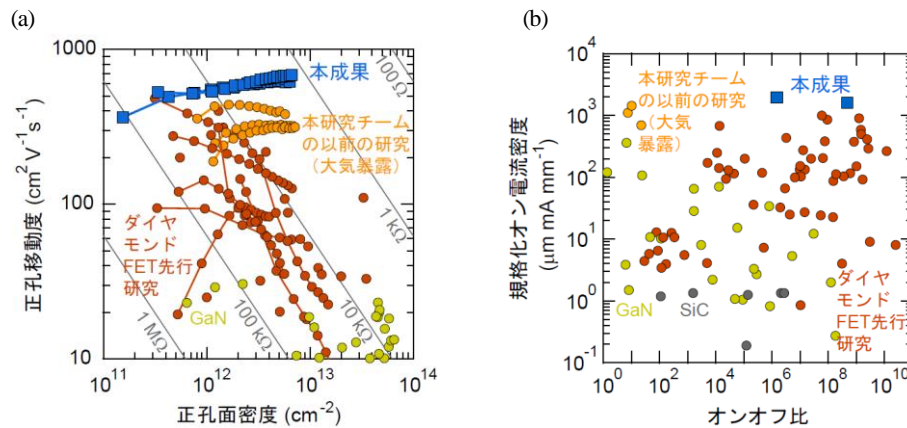


図3 (a) 本研究で作製したダイヤモンド電界効果トランジスタ(FET)および先行研究の正孔移動度と正孔面密度。図中の抵抗値は、チャンネルのシート抵抗。(b) 本研究で作製したダイヤモンド電界効果トランジスタおよび先行研究のオン電流密度とオン・オフ比。オン電流は、(チャンネル長)/(チャンネル幅)で規格化した値を示しています。GaNおよびSiCのpチャンネルFETの結果も示しています。

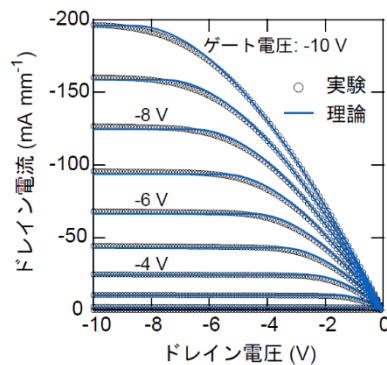


図4 異なるゲート電圧におけるドレイン電流電圧特性。丸印：実験値、実線：反転層チャンネルの標準的な理論による計算結果。ゲート電圧は、一番上の特性が -10V、下に向かって +1V ずつ変化。

研究チームの成功の鍵として、必要不可欠だと考えられてきたアクセプタ⁶を取り除くという従来と真逆の設計指針を用いたことが挙げられます。これまで、水素終端ダイヤモンドにp型の電気伝導を生じさせるには、外部に電子を受け取るアクセプタを付加することが必須だと考えられてきました。水素終端ダイヤモンドを大気に晒すとp型の電気伝導が生じますが、これは水や二酸化炭素などの大気由来の表面吸着物がアクセプタとして働いたためだと考えられています。ゲート絶縁体としてよく使われるアルミナ中の欠陥もアクセプタとして働くと考えられています。正孔の密度を高めるために、NO₂などの酸性ガスや、

V₂O₅などの電子を受け取りやすい酸化物もアクセプタとして使われてきました。

しかし研究チームは、実験と理論の比較によって、アクセプタがトランジスタの性能を制限しており、むしろ取り除くべきだという指針を得ました。(Journal of Applied Physics **127**, 185707 (2020)) 例えば、アクセプタは電子を受け取って負に帯電するため、これによるクーロン力がダイヤモンド中の正孔の動きを妨げ、正孔の移動度を低下させる要因になります。また、アクセプタによって正孔が生成するため、ノーマリオン動作になります。理論的には、アクセプタがなくても、ゲート電圧で反転層として正孔を生成できることがわかりました。

そこで、研究チームはアクセプタを取り除くために、上記の手法でトランジスタを作製しました。六方晶窒化ホウ素は、グラファイトに似た構造をもつ窒素とホウ素からなる層状の絶縁体で、アクセプタとなりうる未結合手が表面に少ないと考えられます。単結晶薄片を貼り合わせる手法のために、一般的な原子層堆積などの成膜によるゲート絶縁体形成の場合に生じるアクセプタの生成も避けられます。さらに、水素終端ダイヤモンド表面を大気に晒さないことで、大気由来のアクセプタも低減できます。このようなアクセプタの低減によって、従来にない高いトランジスタ特性が得られたと考えられます。トランジスタの出力特性は、反転層の特性を示す標準的な式を使って精度良く説明され、新しい設計指針の妥当性も確認されました。(図4) この結果は、外部にアクセプタを付加する特殊な構造ではなく、シリコンのような一般的な半導体と同じ設計思想で、水素終端ダイヤモンドを使った電界効果トランジスタを作製できることを示しています。

今後の展開

本研究成果は、今後のダイヤモンドトランジスタ開発の新しい指針を提供するもので、パワーエレクトロニクスや情報通信の分野で利用できる高性能な素子の開発につながると期待されます。たとえば、電気自動車やドローンなどで利用できる低損失で小型の電力変換装置や、携帯電話基地局や人工衛星などで利用できる高出力高周波増幅器などの実現が期待されます。本研究で示した表面吸着物を除去した構造は、素子の動作安定性・信頼性の向上にもつながると考えられます。

格子振動による散乱で決まるダイヤモンド固有の正孔移動度は、室温で $2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 以上と高く、さらなる移動度の向上の余地があると考えられます。今後、大気由来のアクセプタおよび他の界面欠陥をさらに減らすことで、より高い移動度をもつダイヤモンドトランジスタの実現に向けて研究を進めていきます。また、より実用に適した構造・作製手法をもつダイヤモンドトランジスタの開発を目指します。

掲載論文

題目：High-mobility p-channel wide-bandgap transistors based on hydrogen-terminated diamond/hexagonal boron nitride heterostructures

著者：Yosuke Sasama, Taisuke Kageura, Masataka Imura, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takashi Uchihashi, and Yamaguchi Takahide

雑誌：Nature Electronics

URL：https://doi.org/10.1038/s41928-021-00689-4

掲載日時：2021年12月23日

用語解説

(1) ワイドバンドギャップ半導体

シリコンの1.1 eVや砒化ガリウムの1.4 eVに比べて大きなバンドギャップをもつ半導体。炭化ケイ素 SiC (バンドギャップ：~3.3 eV)、窒化ガリウム GaN (3.4 eV)、酸化ガリウム Ga₂O₃ (~4.9 eV)、ダイヤモンド (5.5 eV) など。その特性から、素子の高電圧、高温、高速、低損失動作などに適しています。

(2) 電界効果トランジスタ

半導体の素子のひとつで、金属(ゲート電極)―絶縁体―半導体の積層構造と、半導体表面の電極(ソース電極とドレイン電極)からなります。ゲート電極とソース電極の間にかかる電圧(ゲート電圧)を変え

ることで、半導体表面を流れる電流（ドレイン電極とソース電極の間を流れるドレイン電流）を制御することができます。これは、ゲート電圧によって半導体の表面（チャンネル）を流れる電子あるいは正孔の密度が変化し、チャンネルのシート抵抗が変化するためです。電流が流れるオン状態と電流が流れないオフ状態を使ったスイッチや、電流の変化を使った信号増幅器として利用できます。電子の密度を変化させるものをnチャンネルトランジスタ、正孔の密度を変化させるものをpチャンネルトランジスタと呼びます。

(3) 水素終端ダイヤモンド

ダイヤモンドを構成する炭素原子は周りの4つの炭素原子と共有結合していますが、ダイヤモンド表面では結合の手が余ります。そこに水素が結合しているダイヤモンドを水素終端ダイヤモンドといいます。ダイヤモンド表面を水素プラズマに晒すことで水素終端を形成することができ、その構造は大気中でも安定です。少量のメタン（炭素原料）を添加した水素のプラズマを用いた化学気相成長法によって成膜したダイヤモンドの表面も水素終端になっています。

(4) 移動度

電子や正孔の動きやすさを表す指標。電子や正孔の平均速度は、電界が小さいときには電界に比例しますが、その比例定数を指します。電荷をもった不純物など、電子や正孔の動きをさまたげる散乱の要因が多いほど、移動度は低下します。電界効果トランジスタにおいては、ゲート電極下のチャンネルの電子あるいは正孔の移動度が高いほど、チャンネル伝導度、最大ドレイン電流や最大動作周波数を高くすることができ、低損失や高速動作につながるため、高い移動度が望まれます。

(5) ノーマリオフ

電界効果トランジスタの動作の種類のひとつで、ゲート電圧がゼロの場合にはチャンネル抵抗が非常に高く実質的にドレイン電流を流すことができず、ゲート電圧をかけるとチャンネル抵抗が下がりドレイン電流を流せるようになるもの。エンハンスメント型ともいいます。スイッチとして使う際、フェールセーフの観点から求められる動作特性です。ゲート電圧がゼロの場合にもドレイン電流が流れるものをノーマリオンあるいはデプレッション型といいます。

(6) アクセプタ

半導体の価電子帯（バンドギャップの下にある電子で満たされたバンド）から電子を受け取って、正孔を生じさせる不純物。例えば、シリコンに入れられたホウ素はアクセプタとしてはたらきます。このように通常半導体の中に入れられますが、水素終端ダイヤモンドの場合、外部にあるアクセプタがダイヤモンドのなかに正孔を生じさせると考えられています。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点表面量子相物質グループ
主幹研究員 山口 尚秀（やまぐち たかひで）

（国立大学法人筑波大学 数理物質系 准教授（連携大学院）兼務）

E-mail: YAMAGUCHI.Takahide@nims.go.jp

TEL: 029-860-4885

URL: <https://www.nims.go.jp/personal/yamaguchi-takahide/>

（報道・広報に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp