

水素終端ダイヤモンド/六方晶窒化ホウ素ヘテロ構造を用いた高移動度トランジスタ (High-Mobility Transistor Based on a Hydrogen-Terminated Diamond/h-BN Heterostructure)

物質・材料研究機構*1, 筑波大学*2
笹間 陽介*1, 山口 尚秀*1,*2

アブストラクト

ダイヤモンドは、他の主要なワイドギャップ半導体にはない高い正孔移動度という際立った特徴を有する。その高い正孔移動度は、**p** チャンネルの高移動度電界効果トランジスタ(FET)の作製に有利である。しかし、これまでに報告されてきた **p** チャンネルのダイヤモンド FET の正孔移動度の多くは、バルクのダイヤモンドの値よりも 1 桁以上低く、ダイヤモンド本来の高い正孔移動度が活かされていなかった。我々は、高品質な水素終端ダイヤモンド/六方晶窒化ホウ素(h-BN)ヘテロ構造を利用することによって、室温において $1000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ に達する高い正孔移動度を得ることに成功した。我々の研究は、水素終端ダイヤモンドが FET 材料として高いポテンシャルを有していることを示している。

1. 序論

ダイヤモンドは、高絶縁破壊電界や高熱伝導率、高移動度など優れた半導体特性を有するワイドギャップ半導体であるため、パワーデバイス材料としての利用が期待されている。特に、ダイヤモンドは正孔移動度が高く、これは SiC や GaN、 Ga_2O_3 などの他のワイドギャップ半導体にはない特徴である。正孔をキャリアとした **p** チャンネル電界効果トランジスタ(FET)として、ダイヤモンドを利用する場合には、ダイヤモンド表面を水素で終端した水素終端ダイヤモンドがよく利用されている。これまでに水素終端ダイヤモンドを利用した FET²⁻⁵⁾が様々報告されてきた。しかし、それらの FET で報告された移動度の多くは $200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 以下であり、ダイヤモンドの特徴である高い正孔移動度 ($>2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) が活かされていなかった。

我々は高品質な六方晶窒化ホウ素(h-BN)/水素終端ダイヤモンドヘテロ構造を作製する手法を確立し、これを利用することによって、室温で $1000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 程度の高いチャネル移動度を最近実現した。これは、h-BN ゲート絶縁体の利用、大気フリープロセスの開発、ダイヤモンド表面の高品質化という 3 つのステップで達成された。本稿では、水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造を利用したダイヤモンド FET に関する我々のこれまでの研究についてまとめる。なお、2 節と 3 節で述べる研究の一部は、以前の NEW DIAMOND 誌^{6,7)}により詳しくまとめているので、合わせてご覧いただけると幸いである。

2. h-BN ゲート絶縁体の利用

我々は、水素終端ダイヤモンド FET の高移動度化に向けて、まずゲート絶縁体の高品質化に取り組んだ。これまでに報告されてきた水素終端ダイヤモンド FET で用いられてきたアモルファスのゲート絶縁体は、膜中の荷電不純物密度やトラップ準位密度が高く、それらがキャリアの散乱源となり移動度を律

速していると考えた。その解決のため、我々は2次元層状構造を持つ絶縁体である h-BN 単結晶に着目した。h-BN は、高温高压合成によって高品質な単結晶が合成されている⁸⁾。層状構造であり、へき開によって平坦な表面が得られることが知られている。高品質な h-BN 絶縁体を水素終端ダイヤモンドに直接貼り合わせることで、原子層堆積法などの成膜手法で生じやすいゲート絶縁体中の欠陥に起因するトラップ準位密度を低減できることを期待した。

我々は、スコッチテープを用いたへき開によって得られた単結晶 h-BN 薄片を水素終端ダイヤモンド上に貼り合わせ、それをゲート絶縁体として用いた FET を作製した。キャリア密度と移動度を正確に評価するため、FET はゲート付き Hall バー構造とした。Hall 効果測定の結果、図 1 の▲に示すように、室温で比較的高いキャリア密度とともに $300 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 程度の高い移動度⁹⁾が得られた。さらに低温で、高品質な 2 次元正孔ガスの形成を示唆する量子振動の観測¹⁰⁾にも成功した。しかし、室温で $300 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 程度という移動度にはさらなる向上の余地があると考えられた。そこで理論的な解析から、移動度の律速要因の検討を行った。その結果、主要因は水素終端ダイヤモンドと h-BN の界面に存在する電荷によるクーロン散乱であることが示唆された^{11, 12)}。これらの電荷の起源は、大気由来のイオン化した表面アクセプターであり、水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造を大気中で作製したために存在していると考えられた。

研究開始当初、我々はグラフェン/h-BN ヘテロ構造で知られるセルフクレンジング効果¹³⁾を期待していた。グラフェン/h-BN ヘテロ構造の場合、この効果により、ヘテロ構造が作製される際に界面の不純物が押し出され、清浄な界面が形成される。しかし、我々の実験結果は、水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造の場合には、トランスファードーピングに寄与するイオン化した表面アクセプターが、界面に残留していることを示唆していた。これはイオン化した表面アクセプターがダイヤモンド中の正孔と電気的に引き合うためであろう。ただし、界面に不純物が凝集したバブルが観測されたことから、電気的に中性な炭化水素などの不純物に対しては、限定的なセルフクレンジング効果が働いていると考えている。

3. 大気フリープロセスの利用による水素終端ダイヤモンド FET の高移動度化とノーマリーオフ化

そこで次なるステップとして、大気由来の表面アクセプター密度を低減させるため、水素終端ダイヤモンド表面を大気に晒すことなく h-BN ゲート絶縁体を作製する大気フリープロセスを開発し、それを利用した FET を作製した。図 2 の模式図に示すように、このプロセスでは、水素プラズマ処理によって水素終端化したダイヤモンドを、搬送用の真空チャンバーを用いて、Ar 雰囲気グローブボックスへ真空搬送し、グローブボックス中で h-BN を水素終端ダイヤモンド上に貼り合わせる。水素終端表面を大気に晒さないことにより、トランスファードーピングに寄与する大気由来の表面アクセプター密度を低減させた。

作製した表面アクセプター密度を低減した水素終端ダイヤモンド FET の移動度を Hall 効果測定から評価した。移動度は最高で $680 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ に達し (図 1 の●)、前節で述べた大気中で水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造を作製した FET と比べ、2 倍以上高い移動度が得られていることが分かった¹⁴⁾。この FET のもう 1 つの特筆すべき点は、高い移動度とノーマリーオフ動作を同時に実現したことである。一般に、水素終端ダイヤモンド FET は、ゲート電圧を印加していないときにもドレイン電流が流れるノーマリーオン動作になることが多かった。これは、ほとんどの場合、水素終端ダイヤモンド表面が大気に晒されており、その際に吸着した表面アクセプターによって生じるトランスファードーピングのために、

ダイヤモンド表面に2次元ホールガスが形成されているためである¹⁵⁾と思われる。これに対し、我々のFETでは水素終端表面を大気に晒さないプロセスを利用したことにより、大気由来の表面アクセプター密度が低減され、ゲート電圧を印加しない状態では水素終端ダイヤモンドの電気抵抗は高く、ノーマリーオフ動作が実現されたと考えている¹⁴⁾。ただし、閾値電圧は水素終端ダイヤモンド上の表面アクセプター密度だけでなく、ダイヤモンド中の不純物濃度やゲート電極の仕事関数とのバランスによって決まるため、表面アクセプター密度が低くとも、他の条件によってはノーマリーオン動作となりうる。

これまで水素終端ダイヤモンドの研究では、NO₂ガス吸着¹⁶⁾やMoO₃、V₂O₅などの高電子親和力材料の成膜¹⁷⁾などによって、表面アクセプター密度を増加させる^{18, 19)}アプローチが主流であった。それに対し、我々の表面アクセプター密度を低減させるというこれまでと真逆のアプローチによって、水素終端ダイヤモンドFETの高移動度化とノーマリーオフ化を同時に実現できることが明らかになった点に意義があると考えている。ここで、トランスファードーピングを積極的に利用しないのであれば、なぜ表面を水素終端する必要があるのか、という疑問が生じるかもしれない。ダイヤモンド表面に正孔を誘起するためには、価電子帯上端のエネルギーが高い必要があり、また表面準位密度が小さい必要がある。そのためにはダイヤモンドの表面終端が水素であることは大切なことであると考えている。

4. 水素終端ダイヤモンド/h-BN 界面の品質向上による更なる高移動度化

その後、我々は更なる高移動度化に向けて、ダイヤモンド表面の品質向上に取り組んだ。前節までのFETは、表面を精密研磨した市販の高温高压合成のIIaタイプのダイヤモンド基板上に化学気相成長(CVD)せずに、水素プラズマによる表面の水素終端化処理だけを行っていた。我々は更なる高移動度化に向けて、低メタン濃度でのダイヤモンドのCVD成長によってダイヤモンド表面の高品質化に取り組み、成膜によって得られた比較的平坦なダイヤモンド上にh-BNゲート絶縁体を用いたFETを作製した。

まず、ダイヤモンドの成長に取り組んだ。ダイヤモンド(111)基板上に低メタン濃度のマイクロ波プラズマCVDによってダイヤモンドを成長させると、原子ステップからの横方向の成長が支配的となり、単一ステップすら観測されないほどの原子レベルで平坦なダイヤモンドが成膜できることが報告されている²⁰⁾。先行研究を参考に、メサ構造の作製と低メタン濃度(水素流量に対するメタン流量が0.01%)のCVDによってダイヤモンドを成長させた。その結果、図3cの原子間力顕微鏡(AFM)像が示すように、[111]方向と垂直な方向にステップが存在するものの、平均面粗さが0.15 nm程度の比較的平坦なダイヤモンドが成膜された。

このCVD成膜したダイヤモンド上に、h-BNゲート絶縁体を用いたFET(図3a,b)を作製した。この際、電流の向きがダイヤモンドのステップと平行になるようにソース・ドレイン電極(Hallバーの電流端子)を配置した。ダイヤモンド表面を水素プラズマに晒し、表面を清浄化した後、搬送用の真空チャンバーを用いて、大気暴露せずにAr雰囲気グローブボックスへ真空搬送した。グローブボックス中でh-BNゲート絶縁体を水素終端ダイヤモンド上に貼り合わせた。また、h-BNの転写プロセスも改良し、前節までの平坦なポリマーではなく、曲率を持たせたポリマーを用いることで、界面の不純物をより効率的に押し出せるようにした^{21, 22)}。

作製したFETの室温における移動度は1000 cm²V⁻¹s⁻¹に達し(図1の■)、更なる高移動度化に成功した²³⁾。この移動度は、電子をキャリアとしたGaNの高電子移動度トランジスタ(HEMT)の電子移動度に迫るほど高い。高いチャネル移動度がワイドギャップ半導体をベースとしたpチャネルのFETで得られ

た点は、特筆すべき点であり、ダイヤモンドの p チャンネルデバイスの材料としての優位性を明確に示している。例えば、正孔チャンネル移動度の高いダイヤモンド FET と電子チャンネル移動度の高い GaN-HEMT を組み合わせた相補型回路^{24, 25)}ができれば、インバーターの小型化や回路の高温動作などワイドギャップ半導体デバイスの新たな展開につながることを期待される。

我々は、移動度の温度依存性の測定も行い、移動度の律速要因を検討した。図 4 は Hall 効果測定によって評価した移動度の温度依存性を示している。前節までで述べた FET の実験結果を合わせて示している。CVD 成長させたダイヤモンド上に作製した FET の移動度は、CVD 成長なしのダイヤモンド上に作製した以前の FET に比べて、温度の低下とともにより急峻に移動度が増加している。温度の低下とともに、フォノン散乱に制限される移動度は上昇するのに対し、クーロン散乱、表面ラフネス散乱に制限される移動度は減少する。すなわちこの結果は、CVD 成長させたダイヤモンド上の FET において、クーロン散乱及び表面ラフネス散乱が以前よりも抑制されたことを示している。

このことは、移動度の理論解析からも裏付けられた。移動度の温度依存性とキャリア密度依存性を理論的に計算し、実験結果と比較した。理論計算の結果、本節の FET では、前節で述べた FET と比較し、界面電荷密度が $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ から $2.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ に低減され、ダイヤモンド表面の平均面粗さが 0.18 nm から 0.15 nm に低減されたことが示唆された。このことは、クーロン散乱と表面ラフネス散乱の両方が抑制されたことにより移動度が向上したことを裏付けている。界面電荷密度の低減は、h-BN の貼り合わせプロセスの改良と表面ラフネスの低減の両方によるものであると考えている²³⁾。このように、我々は高品質な水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造を利用することにより、FET の高移動度化に成功した。

5. まとめ

本稿では、水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造を用いた FET に関する我々のこれまでの研究をまとめた。本研究に着手する以前は、水素終端ダイヤモンド FET の移動度の多くは、バルクのダイヤモンドの移動度と比べて 1 桁以上低く、移動度の律速要因も明確になっていなかったように思われる。我々は、理論的な解析から移動度の律速要因を明らかにするとともに、高品質な水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造を用いた FET を作製し、ワイドギャップ半導体をベースにした p チャンネル FET として最高水準である $1000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 程度の高い移動度を実験的に示すことに成功した。この成果は、水素終端ダイヤモンド FET が高いポテンシャルを有していることを明確に示すものである。また、紙面の都合により本稿では詳述しないが、水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造を作製した後、斜め方向から Pd を蒸着することで h-BN のエッジと自己整合したゲート電極を備えたダイヤモンド FET の作製プロセスも開発した²⁶⁾。本稿では我々の研究に絞って述べたが、我々の研究を契機として、水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造にフォーカスした理論研究²⁷⁻²⁹⁾や、ダイヤモンド上への h-BN 直接成膜を目指した研究^{30) 31)}も報告されている。他グループからも h-BN ゲート絶縁体を用いたダイヤモンド FET に関する報告³²⁾もある。このように、水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造は、優れたデバイス実現の基盤となることが期待される。今後も、ダイヤモンドの優れた特性を最大限に活用したデバイス実現に向け、さらに研究を進めていきたい。

謝辞

本稿で紹介した研究成果の一部は、小松克伊氏、森山悟士氏、井村将隆氏、寺地徳之氏、渡邊賢司氏、谷口 尚氏、内橋 隆氏、蔭浦泰資氏、岩崎拓哉氏との共同研究です。デバイスの作製には、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業の支援を受けました。津谷大樹氏、渡辺英一郎氏、大里啓孝氏、池田直樹氏、大井暁彦氏らにご支援いただきました。また、安藤寿浩氏、小泉 聡氏、若山 裕氏、中山知信氏には研究設備の利用など多大なご助力をいただきました。お世話になりました皆様にこの場を借りてお礼を申し上げます。

技術用語

・表面アクセプター

水素終端ダイヤモンドを大気に晒すと、表面に電気伝導層が形成される。その起源は、トランスファードーピングモデルで説明されることが多い。大気暴露によって吸着した大気吸着物に、ダイヤモンドの価電子帯中の電子がトランスファーされ、その結果としてダイヤモンド表面に正孔が生成する。このような吸着物は、水素終端ダイヤモンドに対してアクセプターとして働くと言える。本稿では、トランスファードーピングに寄与する大気吸着物などを広く表面アクセプターと呼んでいる。トランスファードーピングの際、表面アクセプターは電子を受け取ってイオン化する。

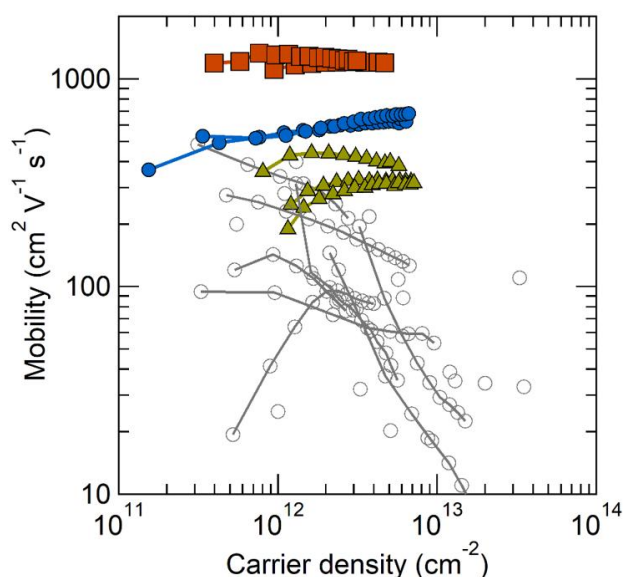


図1 移動度の比較図。横軸はキャリア密度である。塗りつぶしの記号（▲、●、■）は、我々が作製した水素終端ダイヤモンド/h-BN ヘテロ構造 FET の測定結果である。▲および●は CVD 成膜なしのダイヤモンドを、■は CVD 成長を行ったダイヤモンドを用いている。また、プロセスによる違いとして、▲は大気に晒された水素終端ダイヤモンド FET の結果であり、●および■は大気フリープロセスで作製した FET の結果である。比較として、他グループから報告されたダイヤモンド FET の値を○で示した。参考文献は、文献¹⁴⁾の Supplementary information に示している。電力損失低減の観点から、キャリア密度が高い領域で高い移動度が得られることが望まれるが、我々の FET はキャリア密度が比較的高い領域で高い移動度が得られていることが分かる。

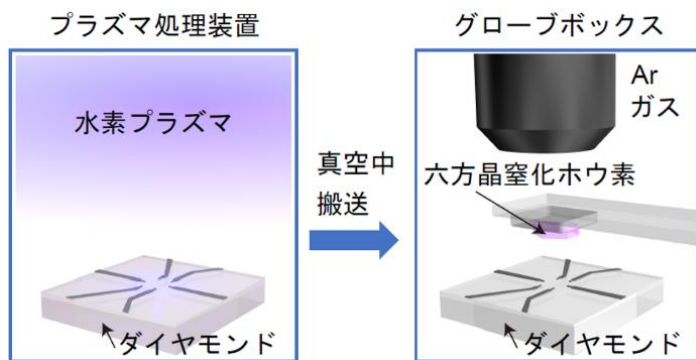


図2 大気フリープロセスの模式図。水素プラズマ処理によって水素終端化したダイヤモンドは、搬送用の真空チャンバーを用いて Ar 雰囲気グローブボックスへ搬送し、グローブボックス中でゲート絶縁体となる h-BN 単結晶を貼り合わせた。このプロセスによって、水素終端ダイヤモンド上に大気とゲート絶縁体中の欠陥に由来する表面アクセプター形成を避けることができる。(Y. Sasama, et al.: Nature Electronics, 5, p. 37 (2022) より引用)

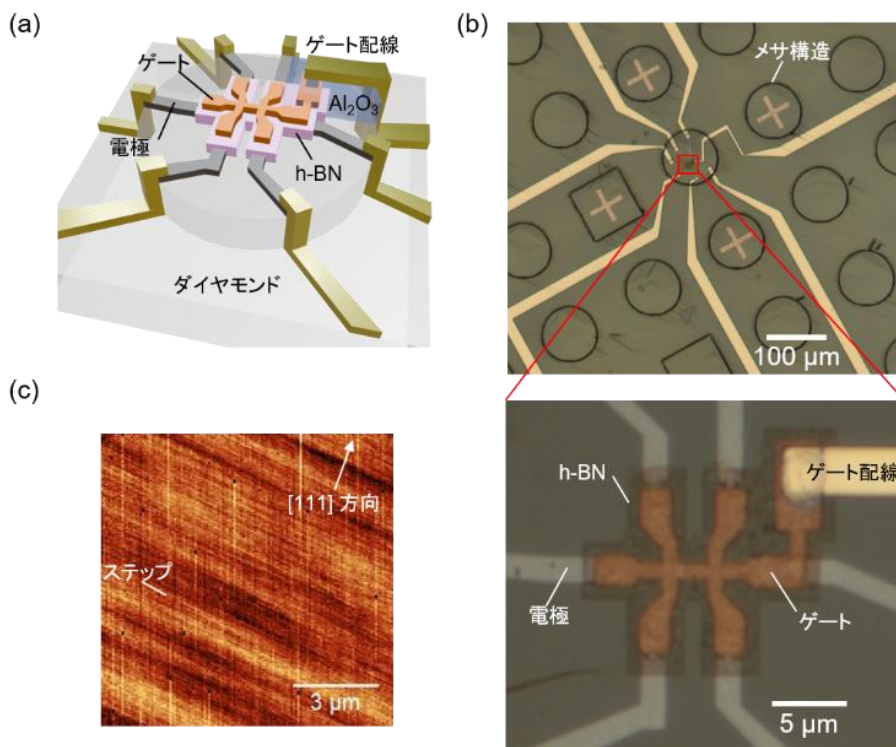


図3 作製したダイヤモンド FET の(a)模式図と(b)光学顕微鏡写真および、(c)メサ構造上に CVD 成膜したダイヤモンド表面の原子間力顕微鏡(AFM)像。AFM 像中の矢印は、二次元平面に投影した[111]方向を示している。(Y. Sasama et al.: Applied Physics Letters, 127, p. 143502 (2025) より引用)

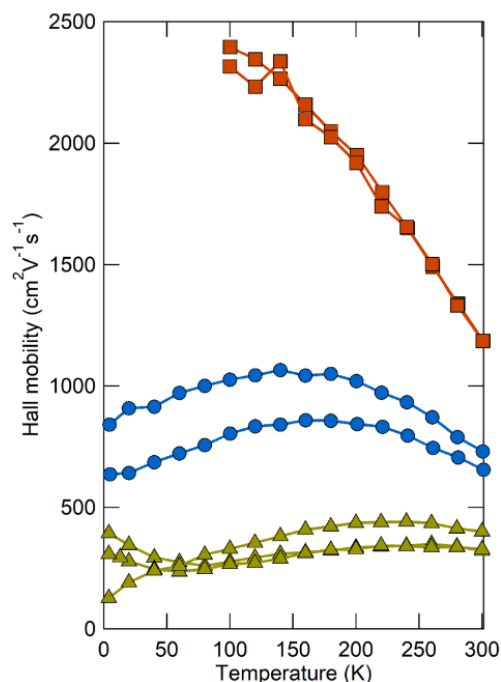


図4 移動度の温度依存性。凡例は図1と同様である (▲ : CVD なし・大気曝露、● : CVD なし・大気フリー、■ : CVD 成長・大気フリー)。各シンボルを結ぶ実線は、同一デバイスにおける温度変化を示している。測定は、それぞれの FET の h-BN 膜厚に基づいて決定した最大ゲート電圧下で行った。(Y. Sasama et al.: Applied Physics Letters, 127, p. 143502 (2025) より引用)

参考文献

- 1) N. Donato, N. Rouger, J. Pernot, G. Longobardi, F. Udrea: Diamond power devices: state of the art, modelling, figures of merit and future perspective, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53, 093001 (2019)
- 2) H. Kwarada, M. Aoki, M. Ito: Enhancement mode metal-semiconductor field effect transistors using homoepitaxial diamonds, *Applied Physics Letters*, 65, 1563 (1994)
- 3) C. Verona, W. Ciccognani, S. Colangeli, E. Limiti, M. Marinelli, G. Verona-Rinati, D. Cannata, M. Benetti, F. Di Pietrantonio: V₂O₅ MISFETs on H-Terminated Diamond, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63, 4647 (2016)
- 4) X. Yu, J. Zhou, C. Qi, Z. Cao, Y. Kong, T. Chen: A High Frequency Hydrogen-Terminated Diamond MISFET With $f_t/f_{\max}$ of 70/80 GHz, *IEEE Electron Device Letters*, 39, 1373 (2018)
- 5) Z. Yin, M. Tordjman, Y. Lee, A. Vardi, R. Kalish, J.A. Del Alamo: Enhanced transport in transistor by tuning transition-metal oxide electronic states interfaced with diamond, *Science advances*, 4, eaau0480 (2018)
- 6) 笹間 陽介, 小松 克伊, 森山 悟士, 井村 将隆, 寺地 徳之, 渡邊 賢司, 谷口 尚, 内橋 隆, 山口 尚秀: hBN ヘテロ界面を用いた 高移動度ダイヤモンド 電界効果トランジスタ, *NEW DIAMOND*, 35, 9 (2019)
- 7) 笹間 陽介, 山口 尚秀: hBN ゲート絶縁体を用いた ノーマリーオフ型高移動度 ダイヤモンド電界効果 トランジスタ, *NEW DIAMOND*, 38, 20 (2022)
- 8) T. Taniguchi, K. Watanabe: Synthesis of high-purity boron nitride single crystals under high pressure by using Ba-BN solvent, *Journal of Crystal Growth*, 303, 525 (2007)

- 9) Y. Sasama, K. Komatsu, S. Moriyama, M. Imura, T. Teraji, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Uchihashi, Y. Takahide: High-mobility diamond field effect transistor with a monocrystalline h-BN gate dielectric, *APL Materials*, **6**, 111105 (2018)
- 10) Y. Sasama, K. Komatsu, S. Moriyama, M. Imura, S. Sugiura, T. Terashima, S. Uji, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Uchihashi, Y. Takahide: Quantum oscillations in diamond field-effect transistors with a h-BN gate dielectric, *Physical Review Materials*, **3**, 121601(R) (2019)
- 11) Y. Sasama, T. Kageura, K. Komatsu, S. Moriyama, J.-i. Inoue, M. Imura, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Uchihashi, Y. Takahide: Charge-carrier mobility in hydrogen-terminated diamond field-effect transistors, *Journal of Applied Physics*, **127**, 185707 (2020)
- 12) G. Daligou, J. Pernot: 2D hole gas mobility at diamond/insulator interface, *Applied Physics Letters*, **116**, 162105 (2020)
- 13) A.V. Kretinin, Y. Cao, J.S. Tu, G.L. Yu, R. Jalil, K.S. Novoselov, S.J. Haigh, A. Gholinia, A. Mishchenko, M. Lozada, T. Georgiou, C.R. Woods, F. Withers, P. Blake, G. Eda, A. Wirsig, C. Hucho, K. Watanabe, T. Taniguchi, A.K. Geim, R.V. Gorbachev: Electronic properties of graphene encapsulated with different two-dimensional atomic crystals, *Nano Lett*, **14**, 3270 (2014)
- 14) Y. Sasama, T. Kageura, M. Imura, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Uchihashi, Y. Takahide: High-mobility p-channel wide-bandgap transistors based on hydrogen-terminated diamond/hexagonal boron nitride heterostructures, *Nature Electronics*, **5**, 37 (2022)
- 15) F. Maier, M. Riedel, B. Mantel, J. Ristein, L. Ley: Origin of surface conductivity in diamond, *Physical review letters*, **85**, 3472 (2000)
- 16) M. Kasu: Diamond field-effect transistors for RF power electronics: Novel NO₂ hole doping and low-temperature deposited Al₂O₃ passivation, *Japanese Journal of Applied Physics*, **56**, 01aa01 (2016)
- 17) C. Verona, W. Ciccognani, S. Colangeli, E. Limiti, M. Marinelli, G. Verona-Rinati: Comparative investigation of surface transfer doping of hydrogen terminated diamond by high electron affinity insulators, *Journal of Applied Physics*, **120**, 025104 (2016)
- 18) K.G. Crawford, I. Maini, D.A. Macdonald, D.A.J. Moran: Surface transfer doping of diamond: A review, *Progress in Surface Science*, **96**, 100613 (2021)
- 19) M.W. Geis, T.C. Wade, C.H. Wuorio, T.H. Fedynyshyn, B. Duncan, M.E. Plaut, J.O. Varghese, S.M. Warnock, S.A. Vitale, M.A. Hollis: Progress Toward Diamond Power Field-Effect Transistors, *physica status solidi (a)*, **215**, 1800681 (2018)
- 20) N. Tokuda, H. Umezawa, S.-G. Ri, M. Ogura, K. Yamabe, H. Okushi, S. Yamasaki: Atomically flat diamond (111) surface formation by homoepitaxial lateral growth, *Diamond and Related Materials*, **17**, 1051 (2008)
- 21) F. Pizzocchero, L. Gammelgaard, B.S. Jessen, J.M. Caridad, L. Wang, J. Hone, P. Boggild, T.J. Booth: The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures, *Nat Commun*, **7**, 11894 (2016)
- 22) T. Iwasaki, K. Endo, E. Watanabe, D. Tsuya, Y. Morita, S. Nakaharai, Y. Noguchi, Y. Wakayama, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Moriyama: Bubble-Free Transfer Technique for High-Quality Graphene/Hexagonal Boron Nitride van der Waals Heterostructures, *ACS Appl Mater Interfaces*, **12**, 8533 (2020)
- 23) Y. Sasama, T. Iwasaki, M. Imura, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Takahide: Enhanced channel mobility of hexagonal boron nitride/hydrogen-terminated diamond heterojunction field-effect transistor, *Applied Physics Letters*, **127**, 143502

(2025)

- 24) H. Kwarada: Diamond p-FETs using two-dimensional hole gas for high frequency and high voltage complementary circuits, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56, 053001 (2022)
- 25) S. Kawai, N. Oi, T. Isobe, K. Ota, K. Amazutsumi, T. Fujishima, H. Kwarada: Fast power switching with cascode diamond MOSFET-SiC MOSFET/GaN HEMT complementary half-bridge inverter, *APL Electronic Devices*, 1, 046103 (2025)
- 26) Y. Sasama, T. Iwasaki, M. Monish, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Takahide: Self-aligned gate electrode for hydrogen-terminated diamond field-effect transistors with a hexagonal boron nitride gate insulator, *Applied Physics Letters*, 125, 092103 (2024)
- 27) P.S. Mirabedini, B. Debnath, M.R. Neupane, P. Alex Greaney, A. Glen Birdwell, D. Ruzmetov, K.G. Crawford, P. Shah, J. Weil, T.G. Ivanov: Structural and electronic properties of 2D (graphene, hBN)/H-terminated diamond (100) heterostructures, *Applied Physics Letters*, 117, 121901 (2020)
- 28) Q. Gui, Z. Wang, C. Cheng, X. Zha, J. Robertson, S. Liu, Z. Zhang, Y. Guo: Theoretical study of the interface engineering for H-diamond field effect transistors with h-BN gate dielectric and graphite gate, *Applied Physics Letters*, 121, 211601 (2022)
- 29) H. Xu, J. Hu, F. Wang, Y. Qu, Y. Liu: Nucleation Mechanism of Hexagonal Boron Nitride on Diamond (111) and Its Hydrogen-Terminated Surface: A DFT Study, *Langmuir*, 40, 19146 (2024)
- 30) X. Yang, M. Pristovsek, S. Nitta, Y. Liu, Y. Honda, Y. Koide, H. Kwarada, H. Amano: Epitaxial Combination of Two-Dimensional Hexagonal Boron Nitride with Single-Crystalline Diamond Substrate, *ACS Appl Mater Interfaces*, 12, 46466 (2020)
- 31) J. Chen, R. Tao, G. Wang, Z. Yin, L. Zeng, X. Yu, S. Zhang, Y. Wu, Z. Li, X. Zhang: The interface microstructure and band alignment of hexagonal boron nitride/diamond heterojunctions, *Journal of Materials Chemistry C*, 11, 5324 (2023)
- 32) Y. Huang, J. Xiao, R. Tao, Z. Liu, Y. Mo, X. Yu, Z. Cao, Y. Wu, Z. Li, H. Wang, L. Wang: High mobility hydrogen-terminated diamond FET with h-BN gate dielectric using pickup method, *Applied Physics Letters*, 123, 112103 (2023)