

2023年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

調査研究報告書(公開版)

【研究題目】 超高品質二次元材料の低次元電子・スピン特性ナノイメージング

【整理番号】 TK23-024

【代表機関】 東北大学

【調査研究代表者（氏名）】 橋本 克之

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】

物質材料研究機構：岩崎 拓哉

【TIA 外連携機関】

八戸工業高等専門学校：角館 俊行

量子科学技術研究開発機構：境 誠司

【報告書作成者】 橋本克之

【報告書作成年月日】 2024 年 4 月 20 日

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

2023 年 6 月 11 日に「Online meeting on hBN spin defect」と題したオンライン会議をキックオフ会議として開催した。この会議には、TIA 連携研究員に加え、六方晶窒化ホウ素（hBN）スピン中心による発光を国内で先駆けて検出した量子科学技術研究開発機構（量研）の山崎研究員、そして炭素ドーピング hBN の光物性研究を行うドイツ TU-Darmstadt の Vasili 研究員を招聘し、合計 8 名で、最新の動向を共有し、走査プローブ測定に向けた具体的な議論を行った。その結果、ドーピングした炭素が作るスピン中心を用いた新たなアプローチを見出すことができた。

連携機関である物質材料研究機構のナノテクノロジー融合ステーションや量研の最先端微細加工施設を活用することで試料を作製し、東北大学で保有する走査トンネル顕微鏡や電気抵抗検出電子スピン共鳴装置を駆使しそれらの測定を行った。このことにより、最高品質の試料の最先端計測を実施することが可能となった。人的な連携として、試料作製において量研の微細加工施設に 2023 年 10 月と 2024 年 1 月に 1 週間ずつ東北大から学生を派遣した。また、試料の測定では、2023 年 9 月から 2024 年 1 月にかけて 3 回、八戸工業高等専門学校の連携研究員を東北大に受け入れ、走査トンネル顕微鏡観察を実施した。これらの密な連携により、研究推進が迅速化された。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

本研究では、高効率な情報伝達・センシングが期待されるナノスケール低次元電子・スピン材料に焦点を当た。今年度の主な研究活動は、h-BN 原子層内のスピン中心及びグラフェン原子層の伝導電子スピンの検出に関するものである。

h-BN スピン中心を走査プローブ顕微鏡の一つである走査トンネル顕微鏡 (STM) で効率的に検出するために、スピン中心密度が高い炭素ドーパされた hBN フレークを使用した。これは 10nmX10nm の領域で数個のスピン中心が期待されるものである。超高真空チャンバー内に設置された数ミクロンのサイズの hBN フレークに STM 探針を近づける作業は容易ではないが、この問題を克服するために、金基板にマーカーを配置した試料を作製し、その中心に hBN を転写した。図 1 に作製した試料の光学顕微鏡像を示す。図 1 上部挿入図に示すように STM でマーカーをイメージングし、方向を確認しながら hBN にアプローチした。これにより、金と hBN の境界を明確に確認することに成功した (図 1 下部挿入図)。

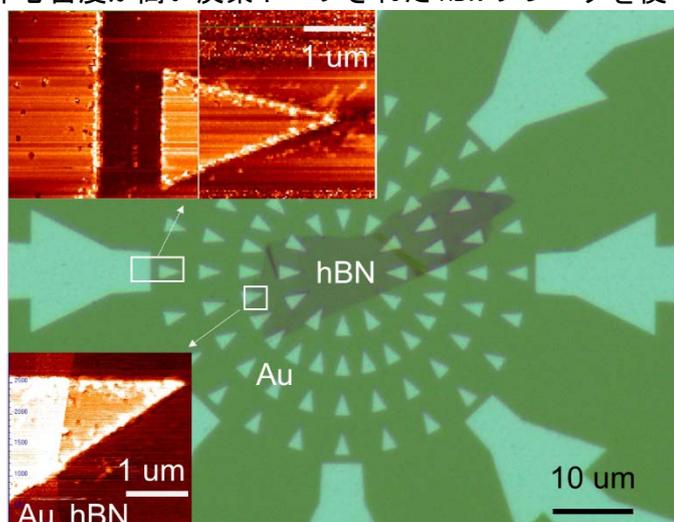


図 1 hBN フレークの STM 観察。金マーカー基板上的 hBN フレークの光学顕微鏡像中の四角部分に相当する STM 像 (上下挿入図)。下挿入図では金と hBN の境界がコントラストの違いであらわされている。

また、グラフェンのスピン特性の解明を目的に、東北大学で抵抗検出電子スピン共鳴 (RD-ESR) の実験システムを構築した。厚さが 1 原子層のグラフェンの ESR 測定は、通常のマイクロ波吸収測定法では困難であるが、ホール素子の形状に加工したグラフェン/サファイア試料にマイクロ波を照射することで、グラフェンチャンネルの電気抵抗変化を通じて ESR 信号を高感度に検出することに成功した。実験の結果から、サファイア上に成長したグラフェンは、剥離法で作製したグラフェン薄片と同等の g 値、スピン緩和時間、スピン軌道相互作用を示すことが明らかになった [1-3]。さらに、グラフェンの反転対称性の破れによると考えられる微小なバンド分裂 (20 μeV) の存在を見出した [4]。

[1] 金田海里, 李松田, 境誠司, 安東秀, 橋本克之, 「単層グラフェンの抵抗検出電子スピン共鳴測定」日本物理学会第 78 回年次大会, 宮城 (2023 年 9 月)

[2] K. Hashimoto, K. Kaneta, Y. Hiraga, S. Li, S. Sakai, R. Kawaguchi, and T. Komeda, “Electrically detected electron spin resonance applied to atomic-layer and single-molecule systems”16th Superconducting SFQ VLSI Workshop, Miyagi, Japan, Nov. 16 (2023).

[3] K. Kaneta, S. Li, S. Sakai, and K. Hashimoto, “Resistively-detected electron spin resonance measurement of single-layer graphene”, Symposium of CRC-GP-MSSP, Miyagi, Japan, Nov. 28 (2023).

[4] Y. Hiraga, K. Kaneta, S. Li, Y. Hirayama, S. Sakai, K. Hashimoto, “Observing Zero-Field Energy Gap in Graphene Grown on Sapphire Substrate” International Conference on the Physics of Semiconductors, Jul. 28-Aug. 2 (2024), Ottawa (Submitted).

【今後の活動予定】

今回確立した hBN フレークへのアプローチ技術を活用し、今後は炭素スピン中心の電子状態と電子スピンドYNAMICSを原子スケールで捉えるため走査トンネル分光及び走査トンネル ESR に取り組む。この技術は量子情報処理における単一スピン量子ビット操作に向けた発展へとつながることが期待される。また、グラフェンの RD-ESR と走査プローブ顕微鏡を組み合わせることで、hBN/グラフェンデバイス中の端チャンネルでのスピン輸送特性をミクロスコピックに明らかにする。さらに、グラフェン/SnTe 等のグラフェン/カルコゲナイドヘテロ構造を対象に、RD-ESR を駆使して、カルコゲン薄膜の近接効果によるグラフェンの電子スピン特性の変化を解明することを目指す。最後に、今回得られた RD-ESR によるグラフェン/サファイア基板の電子スピン特性に関する研究結果を、2024 年 8 月にカナダで開催される半導体物理に関する国際学会 (ICPS 2024) で発表する予定である。

【SDGs17 目標について、調査研究成果について、貢献ができると思われる項目があれば、最大 3 つまで をご記載下さい。】

研究成果に関連する SDGs 目標がある。

関連する SDGs 目標は無い

1 <input type="checkbox"/> 貧困をなくそう	2 <input type="checkbox"/> 飢餓をゼロに
3 <input type="checkbox"/> すべての人に健康と福祉	4 <input type="checkbox"/> 質の高い教育をみんなに
5 <input type="checkbox"/> ジェンダー平等を実現しよう	6 <input type="checkbox"/> 安全な水とトイレを世界中に
7 <input type="checkbox"/> エネルギーをみんなに、そしてクリーンに	8 <input type="checkbox"/> 働きがいも経済成長も
9 <input checked="" type="checkbox"/> 産業と技術革新の基盤を作ろう	10 <input type="checkbox"/> 人や国の不平等をなくそう
11 <input type="checkbox"/> 住み続けられるまちづくりを	12 <input type="checkbox"/> つくる責任、つかう責任
13 <input type="checkbox"/> 気候変動に具体的な対策を	14 <input type="checkbox"/> 海の豊かさを守ろう
15 <input type="checkbox"/> 陸の豊かさを守ろう	16 <input type="checkbox"/> 平和と公正をすべての人に
17 <input type="checkbox"/> パートナリーシップで目標を達成しよう	

以上