

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15385

研究課題名(和文) グラフェン積層ヘテロ構造によるスピン・バレー利用型量子デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of spin-valley quantum devices based on graphene heterostructures

研究代表者

岩崎 拓哉 (IWASAKI, Takuya)

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・独立研究者

研究者番号：50814274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、スピン・バレー自由度を制御するためのグラフェン積層ヘテロ構造素子の開発を目標とし、まず、高品質積層構造を歩留まり良く作製するための独自技術：バブルフリー転写法を開発した。これにより、グラフェン/六方晶窒化ホウ素(hBN)積層ヘテロ構造・モアレ超格子構造を作製し、世界最高水準品質の二層グラフェン素子を実現した。また、モアレ超格子構造を用いた二重量子ドット素子を作製し、モアレ超格子における単一電子輸送および量子ホール効果の観測に成功した。さらに、2枚の二層グラフェンとhBNで構成したツイスト構造素子を作製し、強相関に起因する絶縁状態を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したバブルフリー転写法は、遷移金属ダイカルコゲナイド等様々な層状物質に応用可能であるため、二次元物質研究分野の更なる発展に貢献する重要な成果である。また、モアレ超格子二重量子ドット素子の実現はこれまで困難であった磁場中のモアレ超格子量子ドット特有の単電子輸送特性の解析が可能とし、電子一個を制御する究極の低消費電力・量子情報処理技術の発展に繋がる重要な成果である。ツイスト構造に関する結果は、「折り畳んでツイスト構造を作る」という新しい設計指針を与え、急速に発達している当該分野において、高品質素子作製工程のブレークスルーとなる可能性があり、将来のデバイス応用の基礎となる成果である。

研究成果の概要(英文)：We aimed to develop graphene heterostructure-based devices that control the spin and valley degrees of freedom. First, we developed a bubble-free transfer technique that allows producing high-quality heterostructures with a high yield. By this technique, graphene/hexagonal boron nitride (hBN) heterostructure and moire superlattice were fabricated, and the high quality bilayer graphene device was realized. We also fabricated the double-quantum dot device using the moire superlattice structure and observed the single-carrier transport and quantum Hall effect in the moire superlattice. Furthermore, we fabricated the twisted bilayer/bilayer graphene/hBN device and observed an insulating state due to a strong correlation.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：グラフェン 六方晶窒化ホウ素 モアレ超格子 量子ドット 量子ホール効果 単一電子輸送 量子輸送

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、IoT (Internet of Things) 技術が普及する一方、それに伴うエネルギー消費が大きな問題となっている。この問題を解決するために、従来の電荷の制御に代わり、異なる量子力学的自由度を情報の媒体とする散逸の少ないエレクトロニクスが急務となっている (スピンを利用するスピントロニクス等)。最近では、物質の対称性に起因するバレー自由度を情報の担い手として利用するバレートロニクスが注目され、低消費電力・量子情報処理技術への応用展開が期待されている。バレートロニクスの発展に向けた研究は様々な材料を用いて行われているが、中でもグラフェンは非常に有望な材料として期待されている。特に、グラフェンと六方晶窒化ホウ素 (hBN) の結晶角度を揃えて積層させたモアレ超格子において、バレーの流れを電氣的に検出することが可能なバレーホール効果が発見されている。一方、関連研究の実験報告数は非常に少なく、その主な原因は素子作製に非常に高度な技術が要求されるためである。特に、積層ヘテロ構造作製の成功率は実験者の技術に強く依存し、高品質な素子を再現良く作製できるグループは世界でも限られている。バレートロニクスの研究分野を発展させていくためには、高品質な素子を再現良く実現するための二次元物質転写技術の開発が必要不可欠である。

一方、グラフェンの電子スピンはデコヒーレンス要因が小さいため、グラフェン量子ドットを用いたスピン量子ビット実現の研究が盛んに行われている。グラフェンスピン量子ビット実現のためには、二重量子ドット素子に電子を閉じ込め、電子のスピン依存の閉じ込め効果を調べることが重要である。この二重量子ドット素子をグラフェン/hBN モアレ超格子で実現することができれば、バレーとスピンの二つの自由度を利用した量子情報処理技術の発展に繋がることが期待される。

2. 研究の目的

グラフェン/hBN モアレ超格子積層構造を用いて、量子力学的自由度であるスピンとバレーを用いた基礎的な機能素子の開発を目的とする。そのために、二次元物質の転写技術および高品質積層構造素子の作製プロセスを確立する。また、モアレ超格子による量子ドット素子を実現し、その輸送特性を解析する。

3. 研究の方法

転写技術に関して、ポリマースタンプを用いたドライ転写法をベースとする。従来のドライ転写法において二次元物質間に気泡が入ってしまう問題点がある。積層構造を電子デバイスとして応用する際、この層間の気泡は電荷トラップや散乱中心として電子輸送特性に影響を及ぼし、キャリア移動度の低下等といった素子性能・材料品質劣化の原因となる。この問題に対し、材料同士の接触角度・速度に着目し、各種実験パラメータを最適化することで層間に気泡が入らない積層技術を開発する。

素子作製には電子線リソグラフィ、電子線蒸着、反応性イオンエッチング等、従来の半導体素子作製に用いられてきた微細加工プロセスを利用する。作製した素子を希釈冷凍機、ヘリウムクライオスタット等を用いて、低温環境でキャリア輸送特性を測定・解析する。測定結果を素子作製にフィードバックし、素子設計を改良していく。

4. 研究成果

本研究において、二次元物質積層構造作製のための独自の転写技術：バブルフリー転写法を開発した。この方法では、自作の転写装置と半球状ポリマー表面を持つスタンプを用いて二次元物質の転写を行う。ポリマーにはポリプロピ

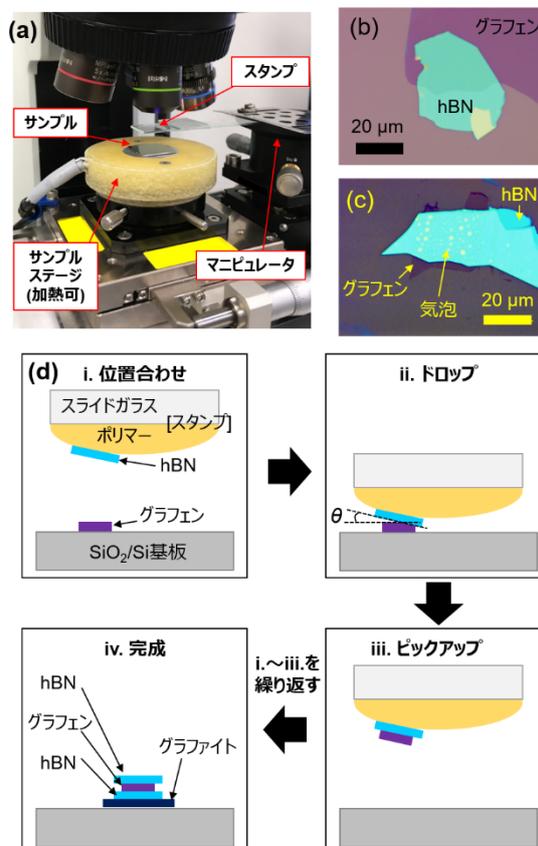


図 1. (a) 転写装置の写真。(b, c) バブルフリー転写法 (b) と従来の転写法 (c) による hBN/グラフェン積層構造の光学顕微鏡画像。(d) バブルフリー転写法プロセスの概略図。hBN/グラフェン/hBN/グラファイトの作製例。

レンカーボネート (PPC) とジメチルポリシロキサン (PDMS) を利用した。転写装置は光学顕微鏡に長焦点対物レンズ、独立可動マイクロマンピュレータ、フォーカシングカプラ、温調可能サンプルヒートステージを取り付けている (図 1(a))。まず、機械的剥離によって基板上に準備した二次元物質を、スタンプ半球の斜面になっている部分でピックアップする (図 1(d-i))。これにより、次の二次元物質にドロップする際に材料間に角度を付け、斜めから貼り合わせることで界面の気泡を逃がしながら密着させ (図 1(d-ii))、気泡の入らない積層構造を実現する。この時、サンプルステージは高温に加熱しておき、機械的剥離による表面のテープ汚染等も逃がす。この積層をさらに持ち上げ (図 1(d-iii))、転写を繰り返すことにより狙った構造を作製する (図 1(d-iv))。この方法で作製した hBN/グラフェンの積層構造では、界面に気泡はほとんど入っていない (図 1(b, c))。この転写法により作製した二層グラフェン/hBN 積層構造をホールバー素子に加工し、低温にて輸送特性を測定した。その結果、世界最高水準の電子移動度 (温度 1.6 K において $\sim 500,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) であることが分かった。また、このバブルフリー転写法は遷移金属ダイカルコゲナイド等様々な層状物質に応用できることも分かった。したがって、バブルフリー転写法の開発は二次元物質研究分野の更なる発展に貢献する重要な成果である。

二層グラフェン/hBN モアレ超格子を微細加工し、二重量子ドット素子を作製した (図 2(a))。この素子の作製について、まずはバブルフリー転写法により hBN/二層グラフェン/hBN/グラファイト積層構造を SiO_2/Si 基板上に準備した。その後、エッチングにより二重量子ドット型に切り出し、もう一度 hBN を転写した後、局所的にポテンシャルを制御するためのトップゲートを 5 個作製した。下のグラファイトは全体のフェルミ準位を制御するためのバックゲートに加工した。ソース・ドレイン電極はエッジコンタクト法にて作製した。また、同一積層構造にモアレ超格子の効果を確認するためのホールバー素子を作製した。

これらの素子のキャリア輸送特性を希釈冷凍機にて最低温度 40 mK で測定した結果、二重量子ドット素子の電荷中性点付近のエネルギー状態において、単一キャリア輸送を示す明瞭なクーロンブロック効果を観測した。また、ドット上のトップゲートを利用することで、二重量子ドット特有の電荷安定ダイアグラムを観測した (図 2(b))。ドット間のトンネル接合上のトップゲートによりポテンシャルを調整することで、二つを結合した単一ドット、または左右どちらかの単一ドットとしても動作でき、作製した素子が高い制御性を持つことを示している。

同一積層構造内のホールバー素子にてモアレ超格子特有の量子ホール効果スペクトル (ホフスタッターの蝶) を観測し、積層角度が 0.85° 、モアレ波長が 10.7 nm であることが分かった (図 2(c))。正孔側のサテライト点に対応する領域に二重量子ドット素子のエネルギー準位を合わせ測定した結果、ファブリ・ペロー干渉効果に類似した電流の周期振動を観測した。これはモアレ超格子効果によるサテライト点近傍のエネルギー状態が寄与している可能性がある。また、二重量子ドット素子のソース・ドレインバイアス電圧を大きくした状態で磁気輸送特性を測定した結果、ホールバー素子と同様に量子ホール効果スペクトルを観測した (図 2(d))。ソース・ドレインバイアス電圧を低くした場合、電荷中性点付近にてクーロン振動が強く抑制される領域を観測した。この領域の境界線はランダウ準位充填率 ± 1 の状態に対応している。そのため、この抑制領域はランダウ量子化に伴うギャップに関連しており、クーロン振動の抑制は単一電子輸送と量子ホール効果の切り替わりを示唆している。これらの結果は、これまで困難であった磁場中の超格子量子ドット特有

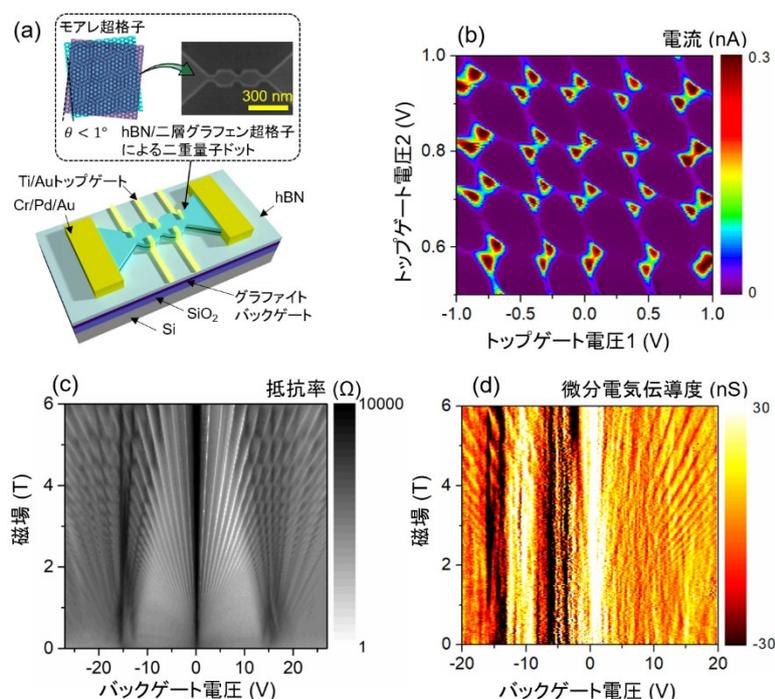


図 2. (a) 超格子・量子ドット素子の模式図と量子ドットの走査電子顕微鏡画像。(b) 量子ホール効果スペクトル (ホフスタッターの蝶) の観測。(c) 二重量子ドットのクーロンブロック効果を表す電荷安定ダイアグラム。(d) 超格子量子ドット素子における量子ホール効果とクーロンブロック効果。温度 40 mK。

の単電子輸送特性の解析が可能とし、電子一個を制御する究極の低消費電力・量子情報処理技術の発展に繋がる重要な成果である。

二次元物質を特定の角度で積層したツイスト構造は、元の物質には見られない新しい物性が発現するため近年注目を集めている。本研究では、2枚の二層グラフェンと hBN で構成したツイスト構造素子 (hBN/二層/二層グラフェン/hBN) を作製した (図 3(a, b))。この素子の

低温キャリア輸送特性を測定した結果、抵抗のキャリア密度依存性にて、通常の二層グラフェンや四層グラフェンでは見られない抵抗ピークを観測した (図 3(c))。これは、温度依存性等を解析した結果、強相関に起因する絶縁状態であることが示唆される。また、二層/二層グラフェンによる抵抗ピークと、二層グラフェン/hBN モアレ超格子による抵抗ピークは、それぞれ別のエネルギー領域に現れており、組み合わせが異なる2つのツイスト積層構造効果が独立して出現することが明らかになった。この成果は、機械的剥離の際に偶然折れ重なった二層グラフェンに着目したことに端を発し、「折り畳んでツイスト構造を作る」という新しい設計指針を与えるものである。従来の材料を破いて重ねる方法に比べて、ダメージが少ないことも大きな利点といえる。これらの結果は、急速に発達している当該分野において、材料選択肢の幅を広げ、高品質素子作製工程のブレークスルーとなる可能性があり、将来のデバイス応用の基礎となる成果である。

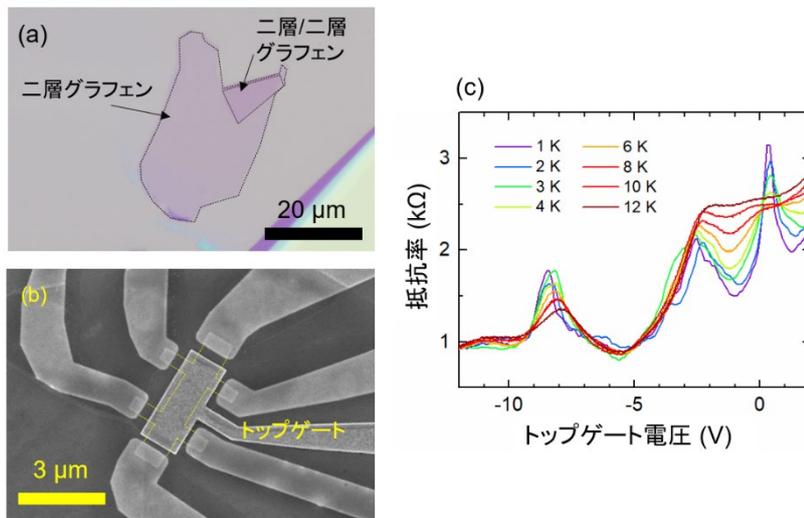


図 3. (a) 二層/二層グラフェン剥片の光学顕微鏡画像。(b) 素子の走査電子顕微鏡画像。(c) 抵抗率のトップゲート電圧依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iwasaki Takuya, Endo Kosuke, Watanabe Eiichiro, Tsuya Daiju, Morita Yoshifumi, Nakaharai Shu, Noguchi Yutaka, Wakayama Yutaka, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Moriyama Satoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Bubble-Free Transfer Technique for High-Quality Graphene/Hexagonal Boron Nitride van der Waals Heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 8533 ~ 8538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmi.9b19191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwasaki Takuya, Morita Yoshifumi, Nakaharai Shu, Wakayama Yutaka, Watanabe Eiichiro, Tsuya Daiju, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Moriyama Satoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Fabrication of folded bilayer-bilayer graphene/hexagonal boron nitride superlattices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 035003 ~ 035003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab790d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwasaki Takuya, Kato Taku, Ito Hirohito, WATANABE Kenji, Taniguchi Takashi, Wakayama Yutaka, Hatano Tsuyoshi, Moriyama Satoshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication and characterization of quantum dot devices based on tetralayer graphene/hexagonal boron nitride heterostructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 024001 ~ 024001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab65a8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwasaki Takuya, Nakaharai Shu, Wakayama Yutaka, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Morita Yoshifumi, Moriyama Satoshi	4. 巻 20
2. 論文標題 Single-Carrier Transport in Graphene/hBN Superlattices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2551 ~ 2557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b05332	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwasaki Takuya, Nakamura Shu, Agbonlahor Osazuwa G., Muruganathan Manoharan, Akabori Masashi, Morita Yoshifumi, Moriyama Satoshi, Ogawa Shinichi, Wakayama Yutaka, Mizuta Hiroshi, Nakaharai Shu	4. 巻 175
2. 論文標題 Room-temperature negative magnetoresistance of helium-ion-irradiated defective graphene in the strong Anderson localization regime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 87~92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.12.076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 T. Iwasaki, K. Komatsu, K. Endo, S. Nakaharai, Y. Noguchi, Y. Wakayama, E. Watanabe, D. Tsuya, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Morita, and S. Moriyama
2. 発表標題 Quantum Transports in hBN/Graphene Superlattices
3. 学会等名 International Conference of Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Iwasaki, K. Endo, E. Watanabe, D. Tsuya, Y. Morita, S. Nakaharai, Y. Noguchi, Y. Wakayama, K. Watanabe, T. Taniguchi, and S. Moriyama
2. 発表標題 High-quality quantum devices based on graphene/hexagonal boron nitride heterostructures fabricated by a bubble-free transfer technique
3. 学会等名 MANA International Symposium 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Iwasaki, K. Komatsu, K. Endo, E. Watanabe, D. Tsuya, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Noguchi, Y. Wakayama, Y. Morita, and S. Moriyama
2. 発表標題 Valley Hall Effects in Graphene/hBN Superlattices
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Iwasaki
2. 発表標題 Valley Hall Effect in Graphene/Hexagonal Boron Nitride Superlattices
3. 学会等名 The 2019 Frontiers in Quantum Materials and Devices workshop (FQMD) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎拓哉, 中弘周, 若山裕, 渡邊賢司, 谷口尚, 守田佳史, 森山悟士
2. 発表標題 二層グラフェン/六方晶窒化ホウ素超格子二重量子ドットにおける単キャリア輸送特性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤博仁, 加藤拓, 岩崎拓哉, 渡邊賢司, 谷口尚, 森山悟士, 羽田野剛司
2. 発表標題 4層グラフェン/hBNヘテロ構造を用いた量子ドットの電子輸送特性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎拓哉, 中弘周, 若山裕, 渡邊賢司, 谷口尚, 守田佳史, 森山悟士
2. 発表標題 折り重ね二層/二層グラフェン素子の作製とキャリア輸送特性
3. 学会等名 第67回春季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎拓哉, 中払周, 若山裕, 渡邊賢司, 谷口尚, 守田佳史, 森山悟士
2. 発表標題 二層グラフェン/hBN超格子における単キャリア輸送特性.
3. 学会等名 第67回春季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎拓哉, 遠藤滉亮, 渡辺英一郎, 津谷大樹, 守田佳史, 中払周, 野口裕, 若山裕, 渡邊賢司, 谷口尚, 森山悟士,
2. 発表標題 パブルフリー転写法による高品質グラフェン/hBN素子の作製
3. 学会等名 第67回春季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤拓, 伊藤博仁, 岩崎拓哉, 渡邊賢司, 谷口尚, 森山悟士, 羽田野剛司
2. 発表標題 4層グラフェン/hBN構造を持つ量子ドットの電気伝導特性
3. 学会等名 第67回春季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤拓, 伊藤博仁, 岩崎拓哉, 渡邊賢司, 谷口尚, 森山悟士, 羽田野剛司
2. 発表標題 垂直磁場下における4層グラフェン単一量子ドットデバイスの電気伝導特性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Iwasaki, Muruganathan Manoharan, Masashi Akabori, Yoshifumi Morita, Satoshi Moriyama, Shinichi Ogawa, Yutaka Wakayama, Hiroshi Mizuta, Shu Nakaharai
2. 発表標題 Negative magnetoresistance of helium-ion-irradiated graphene in the strong Anderson localization regime
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎拓哉, 中弘周, 若山裕, 渡邊賢司, 谷口尚, 守田佳史, 森山悟士
2. 発表標題 モアレ超格子二重量子ドット素子における量子ホール効果と単一キャリア輸送特性.
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤拓, 岩崎拓哉, 渡邊賢司, 谷口尚, 森山悟士, 羽田野剛司
2. 発表標題 4層グラフェンを用いた量子ドット デバイスの垂直磁場依存性
3. 学会等名 第75回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤拓, 岩崎拓哉, 渡邊賢司, 谷口尚, 森山悟士, 羽田野剛司
2. 発表標題 垂直磁場下におけるグラフェン多重量子ドットの結合状態の変化
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎拓哉, 渡辺英一郎, 津谷大樹, 守田佳史, 中払周, 若山裕, 渡邊賢司, 谷口尚, 森山悟士
2. 発表標題 パブルフリー転写法による高品質ファンデルワールス積層構造の作製
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎拓哉, 中払周, 若山裕, 渡邊賢司, 谷口尚, 守田佳史, 森山悟士
2. 発表標題 モアレ超格子二重量子ドット素子における単一キャリア輸送
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Iwasaki, Shu Nakamura, Osazuwa G. Agbonlahor, Manoharan Muruganathan, Masashi Akabori, Yoshifumi Morita, Satoshi Moriyama, Shinichi Ogawa, Yutaka Wakayama, Hiroshi Mizuta, and Shu Nakaharai
2. 発表標題 Observation of charge carrier localization-induced negative magnetoresistance at room temperature in helium-ion-irradiated defective graphene
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Iwasaki
2. 発表標題 Quantum transport in graphene/hexagonal boron nitride superlattices
3. 学会等名 A3 Foresight Program, 7th International Workshop on 2D Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Iwasaki, Shu Nakamura, Osazuwa G. Agbonlahor, Manoharan Muruganathan, Masashi Akabori, Yoshifumi Morita, Satoshi Moriyama, Shinichi Ogawa, Yutaka Wakayama, Hiroshi Mizuta, and Shu Nakaharai
2. 発表標題 Strong Carrier Localization in Defective Graphene Induced by Helium Ion Irradiation
3. 学会等名 MANA International Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 貼り合わせ装置、貼り合わせ方法およびそれを用いた素子の製造方法	発明者 岩崎拓哉, 森山悟士	権利者 国立研究開発法人 物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、2020-037090	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究者総覧SAMURAI https://samurai.nims.go.jp/profiles/iwasaki_takuya

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------