

令和 3 年 4 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01037

研究課題名(和文) 光検出時間分解磁気イメージングで探るナノ構造物理

研究課題名(英文) Nanostructure physics explored by optically detected time-resolved magnetic imaging.

研究代表者

遊佐 剛 (Yusa, Go)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：40393813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では光検出イメージング法とその様々な派生技術を独自に開発し、ナノ構造物理の探索を行った。紫外の350 nmから近赤外の800 nmまでの帯域を持つGaAs, GaN, ダイカルコゲナイドなど各種材料において、核スピンだけでなく、電子、ホール、励起子の電荷やスピンといった自由度をプローブにして多くの物理現象の解明に成功した。本申請で開発した独自技術を用いることで、スカームイオンの解明、整数、分数量子ホールエッジの励起の実空間実時間観測や、スピンヘリックスの輸送現象の解明、GaNでは不純物の特定と不純物密度の高感度検出、グラフェン/InSeデバイスでの光輸送などを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在医療機関などで利用されている磁気イメージング法は、核スピンの共鳴周波数や緩和時間などの空間的な違いを可視化し、診断などに用いる測定法である。本研究は従来とは異なるイメージング法を開発、利用して、半導体ナノ構造と呼ばれる量子効果が顕著に現れる物理の探索を目指した。ナノ構造では波長帯域が紫外光から近赤外光までの材料系(ガリウムヒ素、窒化ガリウム、グラフェン、インジウムセレン等)を探索するとともに、ピコ秒(1兆分の1秒)スケール時間分解イメージングを開発して、電子、スピン、正孔、励起子などのダイナミクス(時間変化)を探索することで新たなナノ構造物理を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this project, we developed optically detected magnetic imaging and its derivative imaging techniques. We explored multifaceted phenomena in nanostructures involving nuclear spins, charges and spins of electrons, holes, and excitons in GaAs, GaN, and dichalcogenides. Our imaging wavelength spanned from 350 nm in the ultraviolet to 800 nm in the near infrared regime. Using the unique imaging techniques developed in this project, we successfully studied many-body effects of skyrmions, real-space and real-time imaging of excited states of chiral edge channels of integer and fractional quantum Hall effects, and spin helix transport in GaAs systems. In GaN systems, we revealed the type and the spatial distribution of impurities. We also studied photoconductivity in graphene/InSe devices and showed new potential applications of Van der Waals crystals.

研究分野：物性物理

キーワード：半導体物性 磁気イメージング 超高速分光

### 1. 研究開始当初の背景

現在医療機関などで利用されている磁気イメージング法(MRI)は、核磁気共鳴(NMR)によって核スピンの共鳴周波数や緩和時間などの空間的な違いを可視化し、診断などに用いる測定法である。通常の NMR はミリメートルサイズのコイルに電磁誘導で発生する微弱な電流を信号として取得するため感度が低く、MRI の空間分解能も通常サブミリメートル程度しかない。しかし近年、このような通常の NMR と異なり、ナノ構造を流れる電子と核スピンの直接的な相関(接触超微細相互作用)を通じて、試料の抵抗や発光の変化を信号とする抵抗検出、光検出 NMR が注目され、特にドイツ、アメリカおよび申請者らを含む日本の研究機関で研究されてきた。この手法により、これまで観測できなかった多体効果を中心とする様々な物理現象が解明された。申請者らはそれと平行して電子スピンの偏極状態を偏光で測定できる走査型偏光分光顕微鏡を使って分数量子ホール状態を初めて実空間で可視化することに成功し[11]、これと光検出 NMR を組み合わせた光検出磁気イメージング(MRI)を開発して、20 年近く謎とされてきた抵抗検出 NMR のメカニズムを解明するなど成果を上げてきた。

MRI 技術の優れた点は、非破壊で対象物を可視化できるだけでなく、さまざまな派生技術が存在することにもある。従来の MRI でも、fMRI(functional MRI)に代表される時間分解測定が注目されており、実空間観察に「動き」という時間軸を導入することで、対象物の機能やダイナミクスを探索することが最先端の研究課題となっている。光検出イメージングでも同様に時間分解測定を行うことが可能である。その成果の1つとして、強磁性相と非磁性相の間の磁壁が核スピンを駆動力として移動する様子を撮影することに成功した。この磁壁移動時間は核スピンの縦緩和時間に対応した秒～分単位である。一方、光検出イメージング法の基礎となる光学測定では、チタンサファイアレーザーやストリークカメラなどの超高速技術の進歩により、ピコ秒やフェムト秒といった電氣的には作り出せない超高速パルスとその応答を制御検出できるようになってきている。

### 2. 研究の目的

光検出イメージング法を、従来の秒～分の時間スケールだけでなく、フェムト秒単位までの極めて広範囲の時間分解測定へと発展させ、従来探索できなかった多体効果を中心としたさまざまな動的物理現象、非平衡現象を解明することを目的とした。具体的には、光検出 NMR を原理とする光検出磁気イメージングやその派生技術を、時間分解測定と組み合わせることで、物理現象の「動き」を可視化できる光検出時間イメージング法を確立し、従来の材料系(GaAs 系半導体)だけでなく、紫外～赤外に光応答を持つ物質(遷移金属カルコゲナイド、GaN)に適用することで、より汎用性の高い測定技術へと進化させることである。

### 3. 研究の方法

本研究は顕微鏡技術、超高速分光、高速輸送測定が基礎となっている。本研究では温度数 10 mK で 16 テスラまでの強磁場が実現できる希釈冷凍機では、光ファイバーを用いた顕微鏡技術を用い、電子のスピンの輸送現象を観測するためには自由空間の顕微鏡技術を用いている。これらを先に述べた2つの目的に応じて改良を進めた。まず目的の時間分解測定への拡張については、半導体試料にレーザー光を照射した際に生成される発光(フォトルミネッセンス, PL)をプローブにする方法を発展させ、ストリークカメラによって数ピコ秒で時間分解可能な顕微時間分解 PL 測定システムを立ち上げた。これにより各種励起子の寿命測定を行うことが可能となった。また、ピコ秒オーダーのレーザーパルス光と電圧パルスを同期させ、ストロボ効果により時間分解を行うことが可能な走査型ストロボスコープ顕微鏡を構築した。自由空間の顕微鏡技術としては分解能が数ピコ秒のカー回転測定を主に利用した。

### 4. 研究成果

ガリウム砒素(GaAs)に関連する成果としてまず  $\nu = 1$  量子ホール状態とその近傍で現れるスカーミオンに関する研究を示す。スカーミオンは  $\nu = 1$  量子ホール強磁性状態から電子を一つ加えるか引き抜くことによって生成させる準粒子で、ゼーマンとクーロン相互作用の競合の結果生み出されるスピントクスチャである。従来は電子を加えるとスカーミンが単体で生成されると考えられて

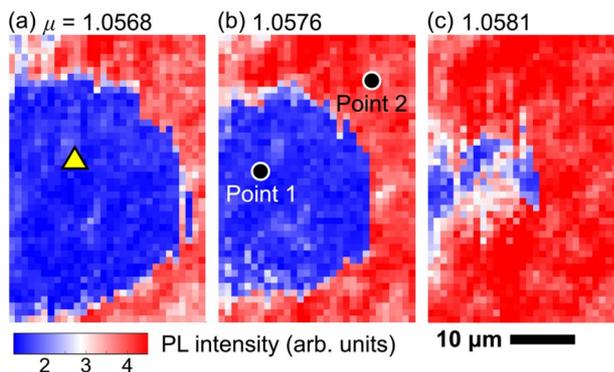


図1  $\nu = 1$  量子ホール状態近傍での顕微 PL 測定。サイズは  $33 \times 40 \mu\text{m}^2$ 。磁場 8 T, 温度 45 mK。青い領域が量子ホール相、赤い領域がスカーミオン相に相当する。

いたが、本研究の顕微イメージングの結果 [1,2]、スカーミオンは単独で存在するのではなく、規格化化学ポテンシャル ( $\mu \equiv \frac{hc_0V_g/e}{eB} + \alpha$  ランダウレベル占有率  $\nu$  とほぼ同義、 $C_0V_g/e$  はゲート電圧  $V_g$  による電子密度の変化量) をわずかに増加させると、ある閾値を超えた際に集団的にスカーミオン相が集団で生成される様子が直接観測された(図 1)。また、顕微 PL 測定の実験特性や、角度依存性、および核スピンの  $T_1$  時間測定などの複数の測定結果からもスカーミオンの集団励起であることが確認された(図 2) [2]。

量子ホール状態はトポロジカル絶縁体の典型例で、バルクはギャップがあり一般に励起はギャップのないエッジに限られる。磁場を印加しているため時間反転対称性が破れており、Magneto-plasmon と呼ばれる励起状態はエッジに沿って空間を伝搬していくことが知られている。この励起状態が励起と検出用のフロントゲート電極及びセンターゲート電極によって、どのように透過と反射を制御検出できるか調べるために図 3 のようなデバイスを作成した。数 ns 程度の時間幅の電圧パルス(方形波)を印加すると、下流の透過側ゲート及び反射側ゲートでは図 4 のような電圧の微分波形に比例した電圧信号が観測され、センターゲートによって、透過と反射が約  $V_c = -0.5$  V 付近で切り替わっている様子が見られた。またこの励起の伝搬速度は  $1 \sim 1.5 \times 10^{-3}c$  ( $c$  は光速  $\sim 3.00 \times 10^8$  m/s) 程度であることが明らかになった [3]。さらに、本研究で独自のストロボスコープ法を開発し、時間分解能数 100 ps 程度で、実空間実時間マッピング測定が可能となった。これは数 ns 幅の電圧パルスに対して、数 ps 幅の光パルスを同期させ、極低温強磁場中に設置された試料に照射する。その際現れる PL を対物レンズで集光して、分光器および CCD でスペクトルを観測するという本研究で開発した独自技術である。繰り返し時間 13 ns で長時間繰り返し積算することで実空間実時間イメージを取得することが可能となる。この走査型偏光分光ストロボスコープ顕微システムを用いて、実時間実空間磁気イメージングを取

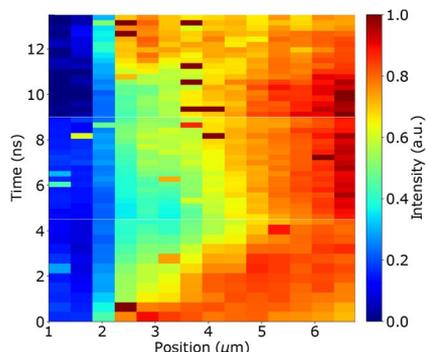


図 5 走査型偏光分光ストロボスコープ顕微測定による発光強度の実時間実空間マッピング。磁場 6 T、温度 80 mK。励起用ゲートからエッジに沿って 20  $\mu\text{m}$  程度離れた場所をエッジに対して垂直に走査した。

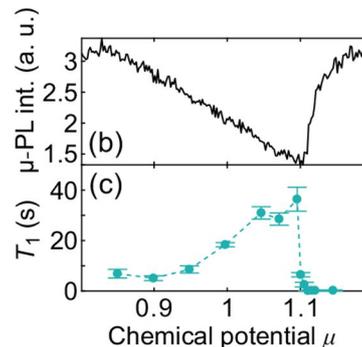


図 2 (a) 顕微 PL 強度と (b) 核スピン緩和時間  $T_1$  の  $\mu$  依存性

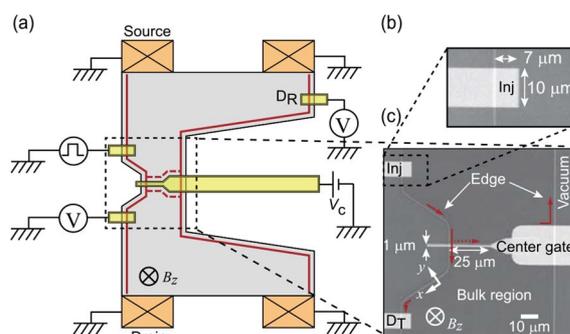


図 3 (a) エッジの励起輸送現象測定のためのデバイス模式図と (b) 励起用ゲート電極および (c) デバイスの中心部の電子顕微鏡写真

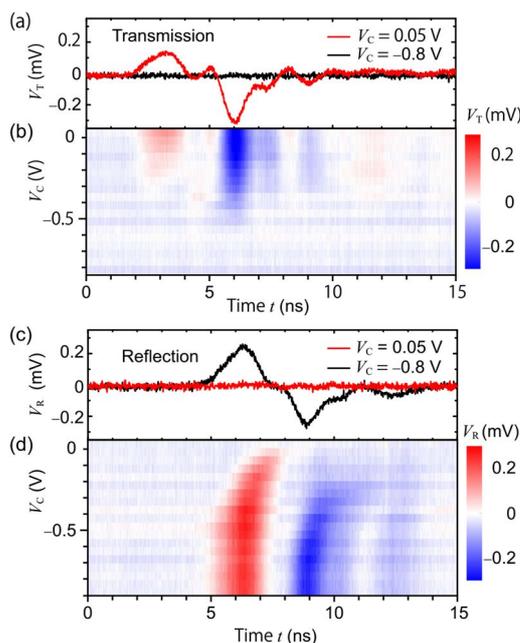


図 4 (a) エッジの励起輸送現象測定のためのデバイス模式図と (b) 励起用ゲート電極および (c) デバイスの中心部の電子顕微鏡写真

得した(図 5)。図 5 は試料端からの距離(Position)および、電圧パルスと光パルスの遅延時間(Time)に対して PL 積分強度をプロットしたものである。エッジの励起状態と光パルスが対物レンズの直下に同時に到達した瞬間、すなわち、Time が約 2 ns ~ 10ns、Position が 2 ~ 5  $\mu\text{m}$  の領域で、PL の発光強度が低下している

ことが分かる。これは電圧パルスによって、励起用ゲート電極から励起状態が生成され空間を伝搬し、 $20\ \mu\text{m}$  程度下流の領域で励起状態が観測されたことを示している [4]。このようなカイラルエッジの励起状態が空間を伝搬の様子を実時間実空間で測定した例はなく今後の研究発展が期待できる。

二次元電子中のスピン軌道相互作用はスピンガルバノ効果やパーシステントスピンヘリックスなどのスピントクスチャといった幅広い物理現象に関わりがある。本研究では顕微カー回転測定を用いて、パーシステントスピンヘリックスについても研究を行った。電場によるスピン輸送の異方性やスピンヘリックスのダイナミクスを測定し [5]、

外部磁場と外部電場によってスピン輸送を (a) パーシステントスピンヘリックス (PSH) [6]、(b) 磁場 PSH、(c) ドリフト PSH、(d) トラベリング PSH と制御できることを時間分解顕微磁気カー回転イメージングによって明らかにした [7,8]。

本研究では時間分解測定だけでなく、様々な材料系に対し磁気イメージング法を適用しナノ構造物理の探索を進めた。窒化ガリウム (GaN) はハイパワー電子デバイスや紫外から緑の発光素子として使用されているが、高品質のためにはわずかに存在する不純物の特定と抑制が重要である。従来の赤外光を中心とした顕微技術を拡張し、非線形光学効果により生成した波長  $350\ \text{nm}$  程度のパルス光を用いることで紫外領域でイメージング測定が可能となった。PL スペクトルの磁場依存性を調べることで (図 7)、二次イオン質量分析法 (SIMS) と比較して超高感度に不純物の起源と密度を特定でき、図 8 に示すように酸素と Si の不純物の取り込まれ方に面方位依存性があることを見出した [9]。不純物密度

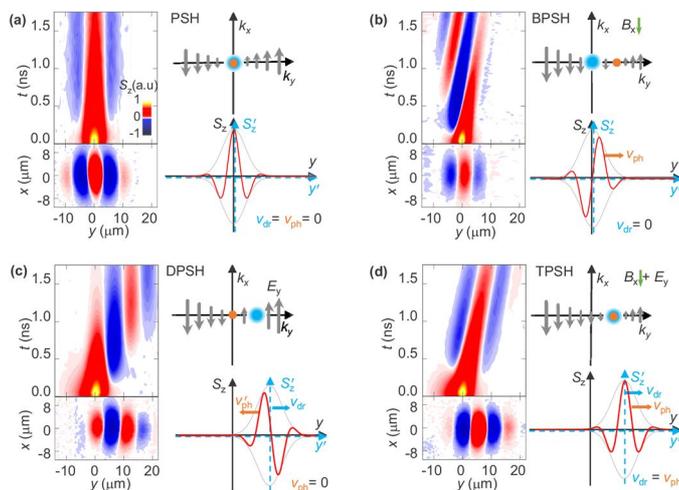


図 6 外部電場と磁場を印加した際のスピン分布  $S_z(x, y, t)$  とその模式図 (a)PSH、(b)磁場 PSH、(c)ドリフト PSH、(d)トラベリング PSH

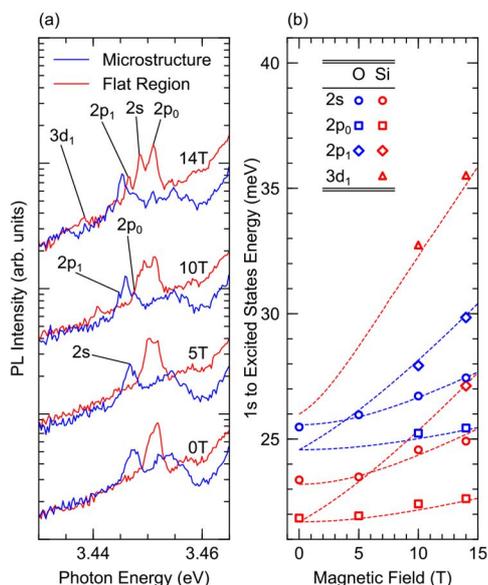


図 7 (a)紫外対応偏光分光顕微測定による発光スペクトルの磁場依存性と (b) 測定結果と理論値との比較による酸素と Si 不純物の磁場依存性。

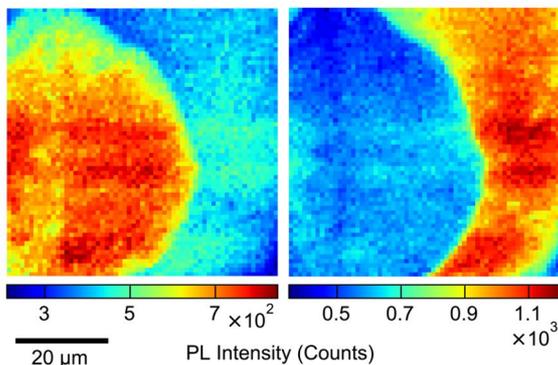


図 8 紫外領域偏光分光顕微測定を用いた、c 面とファセットで構成される GaN マイクロ構造の (左図)酸素および (右図)Si 不純物の空間分布。温度  $4\ \text{K}$ 、磁場  $0\ \text{T}$ 。左図、右図はそれぞれ  $3.4456\text{-}3.4482\ \text{eV}$ 、 $3.4493\text{-}3.4519\ \text{eV}$  の積分強度を表す。

測定だけでなく、紫外光を利用することで空間分解能を向上させることが可能である。

グラフェンや二次元層状物質はさまざまな特性を持った理想的な二次元系を形成するため、近年活発に研究がなされている。特に InSe はグラフェンと異なりバンドギャップがあり、光学応答特性が優れていることから光学素子としての利用が期待されている。本研究では Mn ドープした InMnSe の磁気特性を測定し、磁気異方性やヒステリシス特性等を測定し、薄膜磁性半導体としての有効性を明らかにした。さらに、グラフェンと InSe の界面の物性をフォトカレントイメージング法によって探索した。図 9 に示すように、グラフェンに hBN を挟んだ状態で InSe を積層させた試料に対し、ソースドレイン電流 ( $V_{sd}$ ) を印加しない場合 (図

9(b)と印加した場合(図 9(c))で、フォトカレントが大きく変化していることが分かった。室温で光照射によるフォトカレントのスイッチングも明らかにした [10]

以上のように本研究では光検出イメージング法とその様々な派生技術を独自に開発し、ナノ構造物理の探索を行った。紫外の 350 nm から近赤外の 800 nm までの帯域を持つ GaAs, GaN, ダイカルコゲナイドなど各種材料において、核スピンだけでなく、電子、ホール、励起子の電荷やスピンといった自由度をプローブにして多くの物理現象の解明に成功した。本申請で開発した独自技術を用いることで、スカーミオンの解明、整数、分数量子ホールエッジの励起の実空間実時間観測や、スピンヘリックスの輸送現象の解明、GaN では不純物の特定と不純物密度の高感度検出、グラフェン InSe デバイスでの光輸送などを明らかにした。

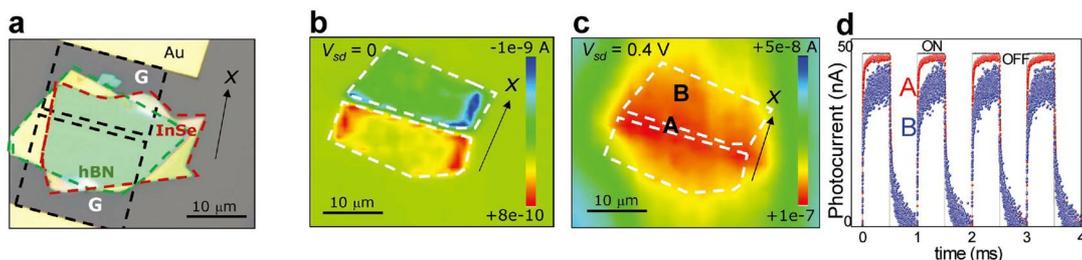


図 9 (a) InSe/hBN-グラフェン試料の光学顕微鏡像(b)(c)フォトカレントイメージング(d)領域 A, B におけるフォトカレントの時間依存性(スイッチング特性)。温度は室温。

#### 参考文献

- [1] J. N. Moore, J. Hayakawa, T. Mano, T. Noda, G. Yusa, Phys. Rev. Lett. **118**, 076802 (2017). *Editors' Suggestion*
- [2] J. N. Moore, H. Iwata, J. Hayakawa, T. Mano, T. Noda, N. Shibata, G. Yusa, Phys. Rev. B **98**, 161402 (2018).
- [3] M. Matsuura, T. Mano, T. Noda, N. Shibata, M. Hotta, G. Yusa, Appl. Phys. Lett. **112**, 063104 (2018). *Editor's Pick*
- [4] M. Matsuura, Ph.D Thesis (2019).
- [5] S. Anghel, F. Passmann, A. Singh, C. Ruppert, A. V. Poshakinskiy, S. A. Tarasenko, J. N. Moore, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, X. Li, A. D. Bristow, M. Betz, Phys. Rev. B **97**, 125410 (2018).
- [6] F. Passmann, A. D. Bristow, J. N. Moore, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, M. Betz, S. Anghel, Phys. Rev. B **99**, 125404 (2019).
- [7] S. Anghel, F. Passmann, K. J. Schiller, J. N. Moore, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, M. Betz, A. D. Bristow, Phys. Rev. B **101**, 155414 (2020).
- [8] S. Anghel, A. V. Poshakinskiy, K. Schiller, F. Passmann, C. Ruppert, S. A. Tarasenko, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, M. Betz, Phys. Rev. B **103**, 035429 (2021).
- [9] A. Kamiyama, K. Kojima, S. F. Chichibu, G. Yusa, AIP Adv. **10**, 035215 (2020).
- [10] M. A. Bhuiyan, Z. R. Kudrynskiy, D. Mazumder, J. D. G. Greener, O. Makarovskiy, C. J. Mellor, E. E. Vdovin, B. A. Piot, I. I. Lobanova, Z. D. Kovalyuk, M. Nazarova, A. Mishchenko, K. S. Novoselov, Y. Cao, L. Eaves, G. Yusa, A. Patanè, Adv. Funct. Mater. **29**, 1805491 (2019).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Anghel S., Poshakinskiy A. V., Schiller K., Passmann F., Ruppert C., Tarasenko S. A., Yusa G., Mano T., Noda T., Betz M.	4. 巻 103
2. 論文標題 Anisotropic expansion of drifting spin helices in GaAs quantum wells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035429-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.035429	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 該当する
1. 著者名 Anghel S., Passmann F., Schiller K. J., Moore J. N., Yusa G., Mano T., Noda T., Betz M., Bristow A. D.	4. 巻 101
2. 論文標題 Spin-locked transport in a two-dimensional electron gas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155414-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.155414	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 該当する
1. 著者名 Kamiyama Akinori, Kojima Kazunobu, Chichibu Shigefusa F., Yusa Go	4. 巻 10
2. 論文標題 Analyzing oxygen and silicon incorporation in GaN microstructures composed of c-planes and angled facets by confocal magneto-photoluminescence microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035215-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5144549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Passmann F., Bristow A. D., Moore J. N., Yusa G., Mano T., Noda T., Betz M., Anghel S.	4. 巻 99
2. 論文標題 Transport of a persistent spin helix drifting transverse to the spin texture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125404-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.125404	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 該当する

1. 著者名 Bhuiyan Mahabub A., Kudrynskyi Zakhar R., Mazumder Debarati, Greener Jake D. G., Makarovskiy Oleg, Mellor Christopher J., Vdovin Evgeny E., Piot Benjamin A., Lobanova Inna I., Kovalyuk Zakhar D., Nazarova Marina, Mishchenko Artem, Novoselov Kostya S., Cao Yang, Eaves Laurence, Yusa Go, Patan? Amalia	4. 巻 29
2. 論文標題 Photoquantum Hall Effect and Light-Induced Charge Transfer at the Interface of Graphene/InSe Heterostructures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1805491 ~ 1805491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201805491	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Moore John N., Iwata Hikaru, Hayakawa Junichiro, Mano Takaaki, Noda Takeshi, Shibata Naokazu, Yusa Go	4. 巻 98
2. 論文標題 Evidence for a correlated phase of skyrmions observed in real space	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161402(R)-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.161402	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 該当する

1. 著者名 Matsuura Masahiro, Mano Takaaki, Noda Takeshi, Shibata Naokazu, Hotta Masahiro, Yusa Go	4. 巻 112
2. 論文標題 Transmission and reflection of charge-density wave packets in a quantum Hall edge controlled by a metal gate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 063104 ~ 063104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5009373	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 Anghel S., Passmann F., Singh A., Ruppert C., Poshakinskiy A. V., Tarasenko S. A., Moore J. N., Yusa G., Mano T., Noda T., Li X., Bristow A. D., Betz M.	4. 巻 97
2. 論文標題 Field control of anisotropic spin transport and spin helix dynamics in a modulation-doped GaAs quantum well	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125410-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.125410	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 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 神山晃範, 松浦雅広, John N. Moore, 間野高明, 野田武司, 遊佐剛
2. 発表標題 分数量子ホールエッジ状態の実空間・実時間観察
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 遊佐剛
2. 発表標題 実空間でみる分数量子ホール系の物理
3. 学会等名 Spin-RNJ年次報告会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Go Yusa
2. 発表標題 Fractional quantum Hall fluid imaged by optically detected micro-MRI
3. 学会等名 International conference on "Emerging Advancement in Science & Technology"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Go Yusa
2. 発表標題 Manipulation of wavepackets for the implementation of quantum protocol via the quantum Hall system
3. 学会等名 The next generation of analogue gravity experiments（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦雅広, 神山晃範, Moore John, 間野高明, 野田武司, 遊佐剛
2. 発表標題 時間分解顕微分光法を用いた量子ホール系における荷電励起子ダイナミクスの研究
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神山晃範、小島一信、秩父重英、遊佐剛
2. 発表標題 磁場印加PL顕微鏡を用いたGaN微細構造への酸素取り込みの研究
3. 学会等名 東北大学 & 理研 第一回連携ワークショップ テラヘルツ光研究の進展棒と産業応用への展望
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦雅広, 神山晃範, Moore John, 間野高明, 野田武司, 遊佐剛
2. 発表標題 時間分解顕微分光法を用いた量子ホール系における荷電励起子ダイナミクスの研究
3. 学会等名 東北大学 & 理研 第一回連携ワークショップ テラヘルツ光研究の進展棒と産業応用への展望
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神山晃範、小島一信、秩父重英、遊佐剛
2. 発表標題 極低温・強磁場顕微鏡による窒化ガリウム中の不純物の可視化
3. 学会等名 東北大学理学研究科6専攻+生命科学科 合同シンポジウム 2020
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遊佐剛
2. 発表標題 実空間観察でみる分数量子ホール系の非平衡状態
3. 学会等名 非平衡・非エルミート系の新奇量子現象（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神山 晃範、小島 一信、遊佐 剛、秩父 重英
2. 発表標題 空間・時間分解PLを用いたGaNの局所励起子応答
3. 学会等名 応用物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G.Yusa
2. 発表標題 Optically imaged stripes in fractional quantum Hall liquid
3. 学会等名 The 23rd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF23)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏木一成、Amalia Patane、遊佐剛
2. 発表標題 希釈磁性半導体InMnSeの基礎特性
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A.Patene et. al.
2. 発表標題 Hybrid quantum systems based on two-dimensional van der Waals crystals
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid quantum System 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Go Yusa
2. 発表標題 Domain structures and nuclear spins in the quantum Hall regime observed in real-space and real-time
3. 学会等名 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices: IWPSD2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Matsuura Masahiro, Mano Takaaki, Noda Takeshi, Shibata Naokazu, Hotta Masahiro, Yusa Go
2. 発表標題 Transmission and reflection of charge density waves in a quantum Hall edge controlled by a metal gate
3. 学会等名 Kick-off Symposium for World Leading Research Centers (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nicholas, N. Moore, Hikaru Iwata, Junichiro Hayakawa, Takaaki Mano, Takeshi Noda, Naokazu Shibata, and Go Yusa,
2. 発表標題 Anomalous quantum Hall skyrmion transition with long-range ordering
3. 学会等名 Kick-off Symposium for World Leading Research Centers (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nicholas, N. Moore, Hikaru Iwata, Junichiro Hayakawa, Takaaki Mano, Takeshi Noda, Naokazu Shibata, and Go Yusa,
2. 発表標題 Anomalous quantum Hall skyrmion transition with long-range ordering
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nicholas, N. Moore, Hikaru Iwata, Junichiro Hayakawa, Takaaki Mano, Takeshi Noda, Naokazu Shibata, and Go Yusa,
2. 発表標題 Photoluminescence investigation of a quantum Hall skyrmion transition
3. 学会等名 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松浦雅広、野田武司、間野高明、堀田昌寛、遊佐剛
2. 発表標題 量子ホールエッジにおける量子エネルギーテレポーテーションの試み
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://quantum.phys.tohoku.ac.jp/">http://quantum.phys.tohoku.ac.jp/</a>
---

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
研究協力者	パタネ アマリア  (Patane Amalia)		
研究協力者	野田 武司  (Noda Takeshi)		
研究協力者	間野 高明  (Mano Takaaki)		
研究協力者	小島 一信  (Kojima Kazunobu)		

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