

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18H01811  
研究課題名(和文)量子ポイントコンタクトにおける電子相関の研究  
  
研究課題名(英文)Electron correlation in quantum point contacts  
  
研究代表者  
平山 祥郎(Hirayama, Yoshiro)  
  
東北大学・先端スピントロニクス研究開発センター・特任教授  
  
研究者番号：20393754  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子構造の基礎になる量子ポイントコンタクト(QPC)の伝導物性について、抵抗で測定する新しいタイプのNMR(RDNMR)を用いて研究を進め、低磁場での特性評価や微細な歪の計測に成功した。さらに、対角抵抗が偶数分母状態に量子化する状況をQPC構造ではじめて実現し、対向するエッジチャンネルの混合が寄与する可能性を示した。さらに、ナノプローブとRDNMRを組み合わせることで、半導体量子系でのMRIを実現し、トレンチゲートを用いることでInSb系でのQPC作製にも成功した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

様々なRDNMR測定を進めたり、対角抵抗の偶数分母量子化を研究したりすることで、半導体量子デバイスの最も基礎的なものである量子ポイントコンタクト(QPC)に関する理解が深まった。得られた知見はQPCを用いた量子干渉計や様々な量子デバイスで得られた測定結果の理解、さらにはこれらのデバイスの設計に大変役立つ。また、半導体量子構造のMRIはミクロに半導体量子物性を探る強力な手法になることが期待できる。マヨラナ物性の観点からも注目を集めているInSb系でのQPC作製もインパクトの大きな研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Transport properties of quantum point contacts (QPCs), which are the basis of semiconductor quantum structures, have been studied using a new type of NMR (resistively detected NMR, RDNMR). The RDNMR was successfully applied in low-magnetic-field region. It was also applied to measure microscopic strain variation. Furthermore, we first found an even-denominator plateau in the QPC diagonal resistance and suggested a possible contribution of mixing of counter-propagating edge channels. In addition, we have successfully demonstrated InSb-QPCs by using trench gates and MRI in semiconductor quantum systems by combining nanoprobe and RDNMR.

研究分野：半導体量子物性

キーワード：メゾスコピック系 量子ポイントコンタクト 電子相関 抵抗検出NMR 分数量子ホール効果 整数量子ホール効果

### 1. 研究開始当初の背景

量子ポイントコンタクト (Quantum Point Contact: QPC、両側を広い二次元系に挟まれた、短い一次元チャネル) は、様々な半導体ナノデバイスや量子相関の基礎を測定する干渉計などの基本になる構造であるが、伝導特性に現れる  $0.7 \times (2e^2/h)$  構造の起源など、その物理が解明されていない現象があった。さらに、分数量子ホール効果状態や InSb 一次元系の制御はトポロジカル量子系への応用も期待されていたが、デバイス特性の一層の改善や QPC 内で生じる伝導特性や電子相関のより深い理解が必要な状況にあった。そのような状況の中、我々のグループはバックゲート高品質 GaAs/AlGaAs ヘテロ構造へのナノデバイスの作製や InSb 量子デバイスの作製で高いレベルの技術を有しており、さらに、QPC 内での電子状態などを明確にできる可能性のある、抵抗検出 NMR (RDNMR、抵抗で見る NMR) で世界をリードするグループとして、ERATO 核スピンエレクトロニクスなどで大きな成果を上げてきた。さらに、ミクロスコピックな特性制御、物性解明に不可欠な極低温で動作するナノプローブに関しても優れた成果を上げてきた。これらの我々のグループの強みを活かして、重要性が増す QPC における物性、特に電子相関の物性を解明することを考え、本プロジェクトをスタートした。

### 2. 研究の目的

QPC における電子物性、特にマイクロ領域における電子相関を、QPC にも適用できることが確認された RDNMR などを用いて研究する。QPC の電子相関については、特に  $0.7$  構造の特性やメカニズム、QPC で生じる新しい伝導特性に関して、電子が通るチャネルの状況を直接見ることができる RDNMR を主に用いて解明することを目指す。様々な電子相関が効いていると考えられる QPC で生じる輸送現象について、電子スピン偏極がどうなっているか、歪の影響はあるか、電子相関が本当に生じているのか、生じているならどのような相関であるかを明確にすることを、数年ですべてを明瞭にすることは不可能ではあるが、大きな目的とする。これと並行して、QPC のデバイス技術を高めるとともに、大きな可能性を秘めた InSb などの新規材料で将来の研究に適した QPC を作製すること、また、より制御性に優れ、ミクロスコピック領域の物性解明に適したナノプローブ技術を RDNMR に応用し、さらに QPC と組み合わせる方向に道を作ることを目指す。

### 3. 研究の方法

RDNMR 研究にも適した GaAs 系 QPC は、我々が開発してきたバックゲート制御が可能な高品質 (移動度が  $10^6\text{-}3 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ) GaAs/AlGaAs 量子井戸二次元電子系を有するウェハからスタートし、その上に QPC 構造を作製した。特に、制御性に優れ、しかもセンターゲートに正のバイアスを印加することでチャネル内の散乱が抑制されることが実証されているトリプルゲート QPC (文献①) を主に用いて研究を推進した。RDNMR に関しては、GaAs 二次元系で世界をリードしてきた RDNMR 研究 (文献②) を QPC に応用することを進め、QPC における RDNMR のメカニズムや QPC に適した RDNMR を追究するとともに、RDNMR で QPC のどのような物性を明らかにできるかを検討し、RDNMR のナイトシフトや  $T_1$  時間測定を利用した物性測定を進めた。新規材料でもある InSb に関しては、バンドギャップが狭くショットキーゲート制御などが難しい点を克服して、InSb に特徴的な特性を抽出することを目指し、研究を進めた。また、ナノプローブによるミクロスコピック制御に向けて、世界に数台しかない希釈冷凍機温度で動作するナノプローブ測定系を駆使した。局所的核スピン制御の RDNMR への応用に向けて、電界による核スピン制御を半導体での MRI に進歩させるとともに、トリプルゲート QPC のセンターゲートをナノプローブに置き換えるために様々な課題を克服した。

コロナ禍で様々な往来が制限されたため、予定していた研究項目の進捗が、一部、かなり遅れたが、期間を 2023 年 3 月まで延長して頂けたことで、ほぼ予定通りの成果を上げることができた。さらに、当初予想していなかった QPC における対角抵抗の分数量子化の研究の進展などがあった。コロナ禍で 2020 年度以降の国際会議発表はやや低調になった

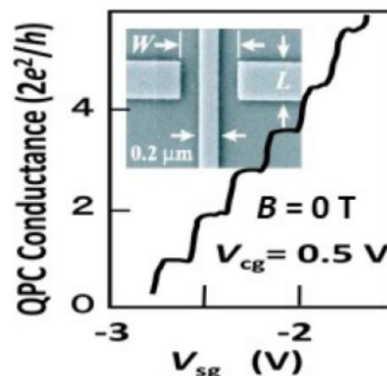


図1 本研究に用いたトリプルゲート QPC の SEM 写真と低温、ゼロ磁場での典型的な伝導特性。

が、プロジェクトのスタートから通して見ると、招待講演、国際会議発表共に高いレベルにあった。

#### 4. 研究成果

##### (1) GaAs 系 QPC の伝導特性に関する研究成果 (主な業績、文献③、④)

研究の基本に据えた QPC について、センターゲートの役割について、実験、理論両面で検討した。特に、QPC の中央部の鞍点型ポテンシャルの形状について、これを反映する QPC のコンダクタンスの立ち上がり部分の微分特性に着目した。不純物によるランダムなポテンシャル分布がある場合の影響について理論的に検討し、不純物がある場合には QPC のデザイン長が増すにつれ、鞍点ポテンシャルから推測される実効長が逆に減少する可能性を T. Aono *et al.*, PRB(2020) に出版し、実験的な検討も進めた。不純物の影響とセンターゲートの影響が重なる場合の特性は解釈が難しいところもあるが、現在、論文執筆中である。

強磁場中での QPC の伝導特性にも大きな進展があった。QPC 両側が  $\nu=5/3$  の分数量子ホール状態の場合に、センターゲートに正のバイアスを加えていくと、QPC の対角抵抗が  $3/2$  に量子化することを見出した (図 2、文献③)。対角抵抗が  $3/2$  になる現象は、移動度が  $10^7 \text{cm}^2/\text{Vs}$  を超える、超高移動度の  $2\mu\text{m}$  角程度の領域で観測されていたが、通常の高移動度の QPC での測定ははじめてであった。さらに、文献④では、QPC の両側を  $\nu=2/3$  にすると、QPC の対角抵抗が  $1/2$  に量子化することも明らかにした。偶数分母量子化の起源として、センターゲート下で電子密度が増えて、 $\nu=1$  などの整数量子エッジチャンネルが形成され、対向して走る整数エッジと分数エッジが強く混合する可能性を示した。なお、ミクロスコピックな領域では、実際に偶数分母状態などの面白い状態が生じている可能性もあり、RDNMR やナノプローブを用いた測定を継続している。これらと並行して、二層系二次元電子系に形成した QPC について、スピン分離に着目して研究を進め、D. Terasawa *et al.*, PRB(2020) などで、ユニークな振る舞いを報告するとともに、GaAs 正孔系のコヒーレント制御について S. Studenikin *et al.*, Comm. Phys. (2019) に発表をした。

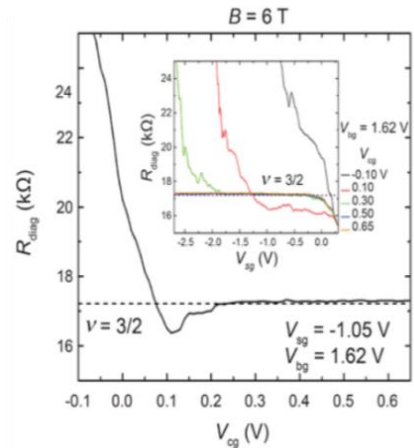


図 2 垂直磁場  $B = 6\text{T}$  で、QPC の両側を  $\nu=5/3$  に設定した時の QPC の対角抵抗値。  $V_{cg}$  (センターゲートバイアス) が増加すると、 $3/2$  に量子化する振る舞いが見られる。挿入図はこの状態での典型的な QPC の伝導特性。

##### (2) GaAs 系 QPC の RDNMR に関する研究成果

(主な業績、文献⑤、⑥、⑦)

QPC の伝導特性、特に電子相関についての理解を深めるため、電子スピン偏極や揺らぎを検出できる RDNMR の QPC への応用を GaAs 系 QPC で推進した。まず、QPC での効率的な核スピン偏極と RDNMR を実現する手法として、QPC の両側を  $\nu=2$  として、QPC 中央部を  $\nu<1$  とすることで、RDNMR が広い磁場範囲で測定できることを示した (図 3、文献⑤)。この測定ではナイトシフトの NMR 信号の半値幅への影響から、強磁場では、電子相関により、QPC 内の電子分布が変化している可能性も示した。さらに、これに先立ち、文献⑥で、QPC の外側を偶数分母、内側を奇数分母として、QPC 近傍でのスピンフリップ散乱を起こさせることで、1T 以下の低磁場で RDNMR 測定が可能であることを図 4 のように示した。ここで、特筆すべきことはこの磁場での QPC の伝導特性は  $0.7 \times (2e^2/h)$  異常を示す付近で完全にゼロ磁場での特性と一致しており、磁場による付加効果を最小限にして、 $0.7$  近傍での  $T_1$  時間などの RDNMR 測定が可能になる点である。このような、新たに見つけた RDNMR の特性を活かして、QPC の  $0.7$  構造に挑む実験は、当初予定よりは遅れているが、継続して実験データが蓄積されてきている。今後、解釈を行い論文にまとめる予定である。さらに、QPC においては図 5 (文献⑦) のように、デバイス内の微細な歪の変化を QPC のチャンネルの位置の変調により RDNMR の四重極分離から測定することにも成功している。この成果により、半導体中に埋め込まれた電子チャンネルにおいて、電子が感じる歪を制御した形で伝導特性を議論できる可能性が出てきた。

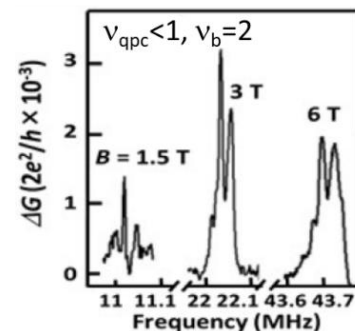


図 3 QPC の両側を  $\nu=2$  に設定し、QPC 中央分を  $\nu_{qpc}<1$  に設定した時に得られる典型的な RDNMR 信号。

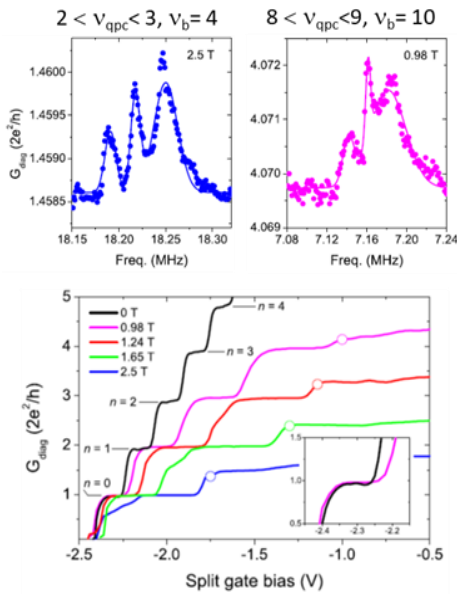


図4 QPCの両側を偶数充填率、QPC中央分を奇数充填率にした時のRDNMR信号例。それぞれ、下図の青(ピンク)の伝導特性の○印の状態で測定されている。0.98Tでも信号が得られ、その時のQPCの伝導特性は、下図の挿入図にあるように、基底量子化値以下の部分で、0.7近傍も含め、ゼロ磁場の特性に完全に一致している。

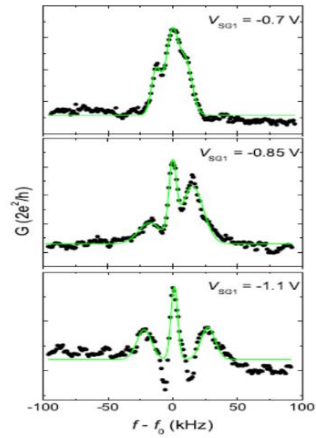


図5 QPCのショットキーゲートバイアスを変えて電子チャネルの位置を変調した時のRDNMRの測定例。四重極分離の変化が明確にわかる。

また、GaAs系をベースにした電子スピン系と核スピン系の相互作用に関しては、局所的に不均一に偏極した核スピン系と二層系の傾角スピン状態(スピン系が南部・ゴールドストーン・モードを有している)が非常に強いユニークな相互作用を起こし、ディック型の超放射が核スピン系で生じている可能性を示唆する特性が得られていることをM. H. Fauzi *et al.* PRB(Letter) (2021)に報告した。

(3) ナノプローブ制御に関する研究成果(主な業績、文献⑧)

ミクロスコピックに半導体量子構造の物性を理解するために、ナノプローブを用いた実験は大変有意義であることから、世界でも少数のグループしか行えない、希釈冷凍機温度でのナノプローブ実験を共同研究者とともに推進した。最初に、RDNMRとナノプローブを組み合わせ、核スピンのミクロスコピックな制御と半導体量子構造におけるミクロスコピックイメージングを目指し、K. Hashimoto *et al.*, AIP Advances(2016)で確立した、電界による核スピン制御を充填率1のGaAs二次元量子ホール系の測定に応用した。図6に示すように、倍周波電界によりナノプローブ下の核スピンを緩和することが可能で、量子ホールブレークダウンで生じる核スピン

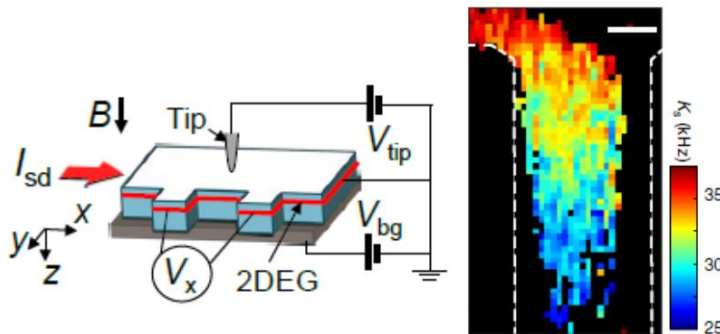


図6  $\nu=1$ 量子ホール状態のブレークダウン領域で測定されたナイトシフトイメージングの一例。ナノプローブ制御とRDNMRを組み合わせることで、半導体量子系のMRIが実現されている。

偏極と組み合わせることで、ナイトシフト分布も含むRDNMRのミクロスコピックイメージングに成功した。これは、半導体量子構造でのMRIの実現であり、ナイトシフトから推定できる電子スピン偏極状態の分布から、量子ホールブレークダウンの理解が深まった(文献⑧)。

さらに、核スピンは絡まないが、量子ホール効果のブレークダウンとナノプローブ測定を組み合わせることで、トポロジカルにプロテクトされた系ではエッジ状態が注入電流に対しロバストであることを示し、これまでとは異なる考え方で非縮退領域のイメージングが可能なることをT. Tomimatsu *et al.*, PRR(2020)に示した。

今後は、GaAs系やInSb系のQPCと組み合わせ、その伝導特性をミクロなレベルで明らかにすることを目指している。すでに、センターゲートのない通常のQPCを作製し、センターゲート

の代わりにナノゲートを利用する実験をスタートしており、面白い伝導特性が出てきている。

(4) InSb 系に拡張した研究成果（主な成果論文⑨、⑩）

マヨラナフェルミオンなどとの関連から関心を集めている InSb 量子構造における電子相関について、InSb 系の QPC 作製を大きな目標にして推進した。InSb 系では GaAs 系のようにショットキーゲートによる制御ができないことから、トレンチゲート型の QPC を試み、図 7 に示したように、量子化コンダクタンスが得られることを示した（文献⑨）。まだ不完全ではあるが、量子化コンダクタンスに対応した構造であることは、並列磁場による一次元準位の交差から確認することができ、そこから実効  $g$  因子も求めることができた。また、ウェアの移動度が予想より低く、期待した特性には至らなかったが、InSb トレンチゲート QPC の中央に ALD 絶縁膜を挟んでセンターゲートを設置し、InSb 系でトリプルゲート QPC を作製する技術も確立できた。

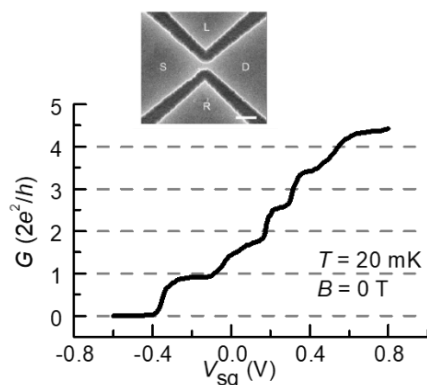


図 7 InSb 二次元系に作製されたトレンチゲート型 QPC とそのゼロ磁場での典型的な伝導特性。

InSb 二次元系における RDNMR にも進展があった。傾斜磁場中で、 $\nu=2$  のスピン状態が交差すること、そこで量子ホール強磁性状態が実現し核スピンを偏極できることを利用した RDNMR 測定 of データ解析を進め、K. F. Yang *et al.*, NJP (2019) で示したポンプ・プローブ法を用いた測定結果の詳細な解析から、 $\nu=2$  の量子ホール強磁性状態のドメインウォールに電子相関による特異な構造（ドメインウォール・スカーミオンのウィグナー結晶化）が生じている可能性を文献⑩で明らかにした。

<引用文献>

- ① H.-M. Lee *et al.*, J. Appl. Phys., 100, 043701 (2006); S. Maeda *et al.*, Appl. Phys. Lett., 109, 143509 (2016).
- ② Y. Hirayama *et al.*, Semicond. Sci. Technol. 24, 023001 (2009) [Topical Review]; Yoshiro Hirayama, "Hyperfine Interactions in Quantum Hall Regime", Chapter in "Quantum Hall Effects" (by Z. F. Ezawa) 3rd Edition (2013).
- ③ Y. Hayafuchi *et al.*, Applied Physics Express 15, 025002 (2022).
- ④ M. H. Fauzi *et al.*, arXiv:2301.07488.
- ⑤ A. Noorhidayati *et al.*, Phys. Rev. B101, 035425 (2020).
- ⑥ M. H. Fauzi *et al.*, Phys. Rev. B97 (RC), 201412 (2018).
- ⑦ M. H. Fauzi *et al.*, Phys. Rev. B100 (RC), 241301 (2019).
- ⑧ K. Hashimoto *et al.*, Nat. Comm. 9, 2215 (2018),
- ⑨ T. Masuda *et al.*, Appl. Phys. Lett. 112, 192103 (2018).
- ⑩ K. Yang *et al.*, Nat. Comm. 12, 6006 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Shibata Kenji, Karalic Matija, Mittag Christopher, Tschirky Thomas, Reichl Christian, Ito Hiromu, Hashimoto Katsushi, Tomimatsu Toru, Hirayama Yoshiro, Wegscheider Werner, Ihn Thomas, Ensslin Klaus	4. 巻 2
2. 論文標題 Magnetotransport of electrically induced two-dimensional hole gases in undoped GaSb quantum wells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033383-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033383	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 Terasawa Daiju, Norimoto Shota, Arakawa Tomonori, Ferrier Meydi, Fukuda Akira, Kobayashi Kensuke, Hirayama Yoshiro	4. 巻 90
2. 論文標題 Large Zeeman Splitting in Out-of-Plane Magnetic Field in a Double-Layer Quantum Point Contact	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024709 ~ 024709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.024709	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 Wang Y. H., Hashimoto K., Tomimatsu T., Hirayama Y.	4. 巻 103
2. 論文標題 Imaging disorder-induced scattering centers in quantum Hall incompressible strip	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085308-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.085308	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 Fauzi M. H., Munro William J., Nemoto Kae, Hirayama Y.	4. 巻 104
2. 論文標題 Double nuclear spin relaxation in hybrid quantum Hall systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L121402-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L121402	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 Yang Kaifeng, Nagase Katsumi, Hirayama Yoshiro, Mishima Tetsuya D., Santos Michael B., Liu Hongwu	4. 巻 12
2. 論文標題 Wigner solids of domain wall skyrmions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 6006-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-26306-8	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 Fauzi Mohammad H., Sobue Takeshi, Noorhidayati Annisa, Sato Ken, Hashimoto Katsushi, Hirayama Yoshiro	4. 巻 259
2. 論文標題 Resistively Detected NMR Lineshapes in a Local Filling $<1$ Quantum Hall Breakdown	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2100504 ~ 2100504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202100504	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 Hayafuchi Yasuaki, Konno Ryota, Noorhidayati Annisa, Fauzi Mohammad Hamzah, Shibata Naokazu, Hashimoto Katsushi, Hirayama Yoshiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Even-denominator fractional quantum Hall state in conventional triple-gated quantum point contact	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 025002 ~ 025002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac4c35	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 Yang K F, Uddin M M, Nagase K, Mishima T D, Santos M B, Hirayama Y, Yang Z N, Liu H W	4. 巻 21
2. 論文標題 Pump-probe nuclear spin relaxation study of the quantum Hall ferromagnet at filling factor $\nu = 2$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 083004-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab34ce	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 Fauzi M. H., Sahdan M. F., Takahashi M., Basak A., Sato K., Nagase K., Muralidharan B., Hirayama Y.	4. 巻 100
2. 論文標題 Probing strain modulation in a gate-defined one-dimensional electron system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 241301(R)-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.241301	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 Studenikin Sergei, Korkusinski Marek, Takahashi Motoi, Ducatel Jordan, Padawer-Blatt Aviv, Bogan Alex, Austing D. Guy, Gaudreau Louis, Zawadzki Piotr, Sachrajda Andrew, Hirayama Yoshiro, Tracy Lisa, Reno John, Hargett Terry	4. 巻 2
2. 論文標題 Electrically tunable effective g-factor of a single hole in a lateral GaAs/AlGaAs quantum dot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 159-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-019-0262-1	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 Noorhidayati Annisa, Fauzi Mohammad Hamzah, Sahdan Muhammad Fauzi, Maeda Shunta, Sato Ken, Nagase Katsumi, Hirayama Yoshiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Resistively detected NMR in a triple-gate quantum point contact: Magnetic field dependence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035425-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.035425	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 Tomimatsu T., Hashimoto K., Taninaka S., Nomura S., Hirayama Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Probing the breakdown of topological protection: Filling-factor-dependent evolution of robust quantum Hall incompressible phases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013128-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013128	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 Terasawa D., Norimoto S., Arakawa T., Ferrier M., Fukuda A., Kobayashi K., Hirayama Y.	4. 巻 101
2. 論文標題 Conductance quantization and shot noise of a double-layer quantum point contact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115401-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.115401	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 Sasaki Susumu, Miura Takanori, Ikeda Kosuke, Sakai Masahiro, Sekikawa Takuya, Saito Masaki, Yuge Tatsuro, Hirayama Yoshiro	4. 巻 10
2. 論文標題 1/f <sup>2</sup> spectra of decoherence noise on 75As nuclear spins in bulk GaAs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10674-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-67636-9	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 Aono T., Takahashi M., Fauzi M. H., Hirayama Y.	4. 巻 102
2. 論文標題 Quantum point contact potential curvature under correlated disorder potentials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045305-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.045305	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 Masuda T., Sekine K., Nagase K., Wickramasinghe K. S., Mishima T. D., Santos M. B., Hirayama Y.	4. 巻 112
2. 論文標題 Transport characteristics of InSb trench-type in-plane gate quantum point contact	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192103-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5023836	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 Fauzi M. H., Noorhidayati A., Sahdan M. F., Sato K., Nagase K., Hirayama Y.	4. 巻 97
2. 論文標題 Dynamic nuclear polarization at high Landau levels in a quantum point contact	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 201412-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.201412	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 Hashimoto Katsushi, Tomimatsu Toru, Sato Ken, Hirayama Yoshiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2215-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-04612-y	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 -

[学会発表] 計54件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 38件)

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Resistively-Detected NMR in Semiconductor Quantum Structures
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hongwu Liu, Kaifeng Yang, Katsumi Nagase, Yoshiro Hirayama, Tetsuya D. Mishima and Michael B. Santos
2. 発表標題 InSb-Based RDNMR Measurement: Recent Developments
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Hashimoto, Y.H. Yihao, T. Tomimatsu, and Y. Hirayama
2 . 発表標題 Scanning gate imaging of scattering between quantum-Hall spin-polarized channels and associated nuclear polarization
3 . 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, H. Ito, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
2 . 発表標題 " Electric-field-induced two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum wells
3 . 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 R. Konno, Y. Hayafuchi, A. Noorhidayati, M. H. Fauzi, N. Shibata, K. Hashimoto, and Y. Hirayama
2 . 発表標題 = 3/2 structure of quantum point contact
3 . 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Haruka Ito, Shaoqing Du, Katsushi Hashimoto, Yoshifumi Hashikawa, Yasujiro Murata, Kazuhiko Hirakawa and Yoshiro Hirayama
2 . 発表標題 Transport characteristics of H <sub>2</sub> O@C <sub>60</sub> single-molecule transistors under magnetic field
3 . 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名	Akira Fukuda, Yutaka Fujii, Yuya Ishikawa, Seitaro Mitsudo, Yoshiro Hirayama, Michael B. Santos
2. 発表標題	Development of mm-wave resistively-detected electron spin resonance system of two-dimensional electron gas in InSb quantum-well structure
3. 学会等名	The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2021) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	福田昭, 藤井裕, 石川裕也, 光藤誠太郎, 平山祥郎, M. B. Santos
2. 発表標題	InSb量子井構造2次元電子系におけるミリ波帯抵抗検出電子スピン共鳴装置の開発
3. 学会等名	日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	金野遼大, 早淵恭章, Annisa Noorhidayati, M. Hamzah Fauzi, 柴田尚和, 橋本克之, 平山祥郎
2. 発表標題	量子ポイントコンタクトの $\nu=3/2$ 構造: センターゲートの重要性
3. 学会等名	日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	早淵恭章, 金野遼大, Annisa Noorhidayati, M. Hamzah Fauzi, 柴田尚和, 橋本克之, 平山祥郎
2. 発表標題	量子ポイントコンタクトの $\nu=3/2$ 構造: 温度、磁場、充填率依存性
3. 学会等名	日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Shaoqing Du, Haruka Ito, Katsushi Hashimoto, Yoshifumi Hashikawa, Yasujiro Murata, Yoshiro Hirayama, Kazuhiko Hirakawa
2. 発表標題 Magnetotunneling Properties of H <sub>2</sub> O/C <sub>60</sub> Single Molecule Transistors
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 平山祥郎
2. 発表標題 半導体量子構造における核スピンエレクトロニクス
3. 学会等名 微細加工ナノプラットフォームコンソーシアム 第4回広島大学・山口大学・香川大学・FAIS 合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daiju Terasawa, Shota Norimoto, Tomonori Arakawa, Meydi Ferrier, Akira Fukuda, Kensuke Kobayashi, Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Enhanced Zeeman Splitting in a Double-Layer Quantum Point Contact
3. 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Hyperfine Mediated Transport in Semiconductor Quantum Structures
3. 学会等名 International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Zhang, Z. Fan, Q. Liao, K. Hashimoto, S. Karube, Y. Hirayama, J. Nitta, M. Kohda
2. 発表標題 Electrical Evaluation of Spin-orbit Interaction Coefficients Near the Persistent Helix State in InGaAs Quantum Well
3. 学会等名 International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田昭, 藤井裕, 石川裕也, 光藤誠太郎, 平山祥郎, M. B. Santos
2. 発表標題 InSb量子井戸構造 2次元電子系のミリ波応答
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平山祥郎
2. 発表標題 半導体量子構造の魅力～核スピンをを用いた高感度計測も含めて～
3. 学会等名 東北大学理学研究科物理学専攻 物理学の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mohammad Hamzah Fauzi, Yasuaki Hayafuchi, Ryota Konno, Annisa Noorhidayati, Naokazu Shibata, Katsushi Hashimoto and YoshiroHirayama
2. 発表標題 Observation of the 3/2 state in conventional triple-gated quantum point contact
3. 学会等名 Internationa Conference on the physics of Semiconducyors (ICPS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yihao Wang, Katsushi Hashimoto, and Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Real space imaging of the quantum-Hall incompressible states influenced by the strong disorder
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week (CSW) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Annisa Noorhidayati, Mohammad Hamzah Fauzi, Shunta Maeda, Ken Sato, Katsumi Nagase, and Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Resistively detected-NMR in triple-gate quantum point contact: magnetic field dependence
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week (CSW) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Hyperfine interaction and resistively-detected NMR in semiconductor quantum systems
3. 学会等名 Frontiers in Quantum Information Physics and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Motoi Takahashi, Sergei Studenikin, Guy Austing, Alex Bogan, Louis Gaudreau, Marek Korkusinski, Piotr Zawadzki, Yoshiro Hirayama, and Andy Sachrajda
2. 発表標題 EDSR of a Single Heavy Hole in Lateral GaAs/AlGaAs Double EDSR of a Single Heavy Hole in Lateral GaAs/AlGaAs Double Quantum Dot Device
3. 学会等名 Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Aono, M. Takahashi, M. H. Fauzi and Y. Hirayama
2. 発表標題 Disorder potential effect on electron transport through quantum point contacts
3. 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Electron Spin Characteristics Unveiled by Resistively-detected NMR
3. 学会等名 Rocky Mountain Conference --- 42nd Int. EPR Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Resistively-detected NMR and nuclear resonance imaging
3. 学会等名 Spintronics Workshop II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋基, M. H. Fauzi, 長瀬勝美, 佐藤健, 青野友祐, 平山祥郎
2. 発表標題 トリプルゲート量子ポイントコンタクトのポテンシャル形状
3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 祖父江剛士, M. H. Fauzi, 高橋基, 長瀬勝美, 佐藤健, 平山祥郎
2. 発表標題 多重ゲート量子ポイントコンタクトを用いた抵抗検出核磁気共鳴
3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Microscopic characterization and resistively-detected NMR of semiconductor quantum systems
3. 学会等名 Workshop Spintronic Tohoku-Mainz-Lorraine 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平山 祥郎
2. 発表標題 半導体量子構造における抵抗検出NMR
3. 学会等名 量子デバイス材料研究ミニワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Aono, M. Takahashi, M. H. Fauzi, Y. Hirayama
2. 発表標題 Correlated disorder potential effect on the conductance through quantum point contacts
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and Photonics (ISNTT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Terasawa, S. Norimoto, T. Arakawa, F. Meydi, A. Fukuda, K. Kobayashi, and Y. Hirayama
2 . 発表標題 Spin splitting induced by spin-orbit interaction in a double-layer quantum point contact
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Sasaki, T. Miura, K. Ikeda, M. Sakai, T. Sekikawa, M. Saito, T. Yuge, and Y. Hirayama
2 . 発表標題 How should we derive the noise spectrum from multiple spin-echo decays?
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Wang, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, and Y. Hirayama
2 . 発表標題 Imaging of the quantum-Hall incompressible strip influenced by disorder
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Takahashi, M. H. Fauzi, K. Nagase, K. Sato, T. Aono, and Y. Hirayama
2 . 発表標題 Potential shape in triple-gated quantum point contacts
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Aono, M. Takahashi, M. H. Fauzi, and Y. Hirayama
2. 発表標題 Gaussian disorder potential effect on electron transport through quantum point contacts
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sobue, M. H. Fauzi, M. Takahashi, K. Nagase, K. Sato, and Y. Hirayama
2. 発表標題 Resistively-detected NMR in multiple gate-defined quantum point contact
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Masuda, K. Nagase, K. Wickramasinghe, T. Mishima, M. B. Santos, M. Kohda, J. Nitta, and Y. Hirayama
2. 発表標題 Transport characteristics of InSb in-plane trench gate quantum point contact devices with metal center gate
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木 進、三浦 敬典、池田 宏輔、坂井 祐大、関川 卓也、齋藤 雅樹、弓削 達郎、平山 祥郎
2. 発表標題 いかにして多重スピネコーから雑音スペクトルを抽出するか？
3. 学会等名 第67回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺澤大樹, 則元将太, 荒川智紀, Meydi Ferrier, 福田昭, 小林研介, 平山祥郎
2. 発表標題 2層系量子ポイントコンタクトにおける巨大なゼーマン分裂
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 T. Aono, M. Takahashi, M. H. Fauzi, and Y. Hirayama
2. 発表標題 Gaussian disorder potential effect on quantum point contact potential curvature
3. 学会等名 Localization2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 HYBRID QUANTUM SYSTEM AND HYPERFINE MEDIATED TRANSPORT PROPERTIES
3. 学会等名 46th International Congress on Science, Technology and Technology-based Innovation (STT46) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Hyperfine-mediated transport properties in semiconductor quantum systems
3. 学会等名 4th QST International Symposium Innovation from Quantum Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Quantum Point Contact, Nanoprobing, and Resistively-Detected NMR
3. 学会等名 Tohoku Quantum Alliance x OIST Quantum Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Microscopic Nuclear-Spin-Resonance in Semiconductor Quantum Systems
3. 学会等名 Frontiers in Quantum Materials & Devices Workshp (FQMD) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. H. Fauzi, A. Noorhidayati, M. F. Sahdan, K. Sato, K. Nagase, Y. Hirayama
2. 発表標題 Dynamic nuclear polarization at high Landau levels in a quantum point contact
3. 学会等名 Int. Conf. in Physics Semicond. (ICPS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Resistively Detected Nuclear Magnetic Resonance in Microscopic Scale
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Hall Effects and Related Topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Resistively-detected nuclear resonance and its imaging
3. 学会等名 China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Noorhidayati, M. H. Fauzi, S. Maeda, K. Sato, K. Nagase, Y. Hirayama
2. 発表標題 Resistively-detected NMR in a quantum point contact in a low magnetic field
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Motoi Takahashi, Mohammad Hamzah Fauzi, Katsumi Nagase, Ken Sato, Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Interplay between Fabry-Pérot resonance and disorder effect in middle mobility quantum point contacts
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week (CSW) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiro Hirayama
2. 発表標題 Microscopic Characterizations Based on Nuclear Resonance
3. 学会等名 France-Japan Bilateral Workshop on Hybrid Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. H. Fauzi, A. Noorhidayati, M. Takahashi, M. F. Sahdan, K. Sato, K. Nagase, Y. Hirayama
2. 発表標題 NMR Probes for Electronic States and Strain Modulation in A Gate-Defined One Dimensional Channel
3. 学会等名 The 2nd Symposium for World Leading Research Centers Materials Science and Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. H. Fauzi, A. Noorhidayati, M. Takahashi, M. F. Sahdan, K. Sato, K. Nagase, Y. Hirayama
2. 発表標題 NMR Probes for Electronic States and Strain Modulation in A Gate-Defined One Dimensional Channel
3. 学会等名 第2回スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワークシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平山祥郎
2. 発表標題 半導体量子状態を用いた核スピン計測
3. 学会等名 応用物理学会2019年春季大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青野友祐, 高橋基, 平山祥郎
2. 発表標題 量子ポイントコンタクトにおける乱れポテンシャルの効果
3. 学会等名 日本物理学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

## 〔図書〕 計3件

1. 著者名 Yoshiro Hirayama	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer-Nature	5. 総ページ数 14
3. 書名 "Diversity of Hybrid Quantum Systems" in Quantum Hybrid Electronics and Materials (editors Y. Hirayama, K. Hirakawa, and H. Yamaguchi)	

1. 著者名 Mohammad Hamzah Fauzi and Yoshiro Hirayama	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer-Nature	5. 総ページ数 19
3. 書名 "Hyperfine-Mediated Transport in a One-Dimensional Channel" in Quantum Hybrid Electronics and Materials (editors Y. Hirayama, K. Hirakawa, and H. Yamaguchi)	

1. 著者名 Katsushi Hashimoto, Toru Tomimatsu, and Yoshiro Hirayama	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer-Nature	5. 総ページ数 21
3. 書名 "Microscopic Properties of Quantum Hall Effects" in Quantum Hybrid Electronics and Materials (editors Y. Hirayama, K. Hirakawa, and H. Yamaguchi)	

## 〔産業財産権〕

## 〔その他〕

<p>東北大学量子伝導物性研究室  <a href="http://quant-trans.org/">http://quant-trans.org/</a>          東北大学大学院理学研究科物理学専攻量子伝導物性研究室  <a href="http://quant-trans.org/">http://quant-trans.org/</a></p>
--



## 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			
米国	オクラホマ大学			
カナダ	NRCカナダ	オタワ大学		
中国	吉林大学			
インドネシア	Indonesia Institute of Science			
スイス	ETH			
インド	IITボンベイ			