

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成27年6月25日現在

機関番号：12608

研究種目：特別推進研究

研究期間：2009～2014

課題番号：21000004

研究課題名（和文） 半導体量子構造による電子波束のダイナミクス

研究課題名（英文） Dynamics of electron wavepackets in semiconductor quantum structures

研究代表者

藤澤 利正 (FUJISAWA, Toshimasa)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20212186

交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：421,400,000円

研究成果の概要（和文）：

本研究では、半導体量子ドット・量子ホール効果・スピントロニクスへの輸送現象を進展し、半導体量子構造による電子波束のダイナミクスに関する研究を推進した。電子やスピン、それらの集団励起であるプラズモン・マグノンに関する電子波束のダイナミクスに関する実験研究と理論研究により、干渉効果・電子相関・非平衡状態・非線形現象などの特徴的な物理現象を明らかにするとともに、高速波束エレクトロニクスや量子情報技術への指針を示した。

研究成果の概要（英文）：

This project promotes fundamental research on dynamics of electron wavepackets in semiconductor quantum structures by extending the transport studies on semiconductor quantum dots, quantum Hall effect, and spin electronics. We have successfully revealed novel phenomena with coherent effects, electron correlations, non-equilibrium states, and non-linear effects in the dynamics of wavepackets for electrons and electron spins as well as their collective modes like plasmons and magnons.

研究分野：数物系科学

キーワード：メゾスコピック系、半導体物性

1. 研究開始当初の背景

ナノサイエンスの進展により、半導体ナノ構造など低次元電子系における新奇な物性の理解と電子波制御技術は著しく発展した。ノーベル賞受賞テーマにもなった整数・分数量子ホール効果の発見により、標準抵抗への応用や、分数電荷をもつ準粒子の重要性が認識され、2次元電子系やそのエッジ状態である1次元電子系における特異な振る舞いが注目されている。また、人工的なナノ構造の設計・作製により、量子ドットなどの0次元電子系の研究が進展し、量子コヒーレンスを応用した量子コンピュータ等への発展が見込まれている。さらに、低次元電子系での特徴的な電子スピンの挙動も注目され、スピントロニクスへの期待も高まっている。

しかし、低次元電子系の輸送現象に関する多くの研究は準静的な直流伝導測定によるものが主流であり、動的現象に関する研究は十分になされていなかった。低次元電子系の物性を理解する上でも、高速電子デバイスや量子情報技術への応用につなげる観点から

も、低次元電子系の動的挙動の研究を推進する必要がある。

そこで、本研究では、低次元電子系で特徴的に現れる相互作用、動的状態、非平衡状態に注目し、低次元の半導体量子構造における電子波束のダイナミクスに関する研究を推進することとした。

2. 研究の目的

本研究では、低次元電子系の実験技術が成熟している半導体量子ナノ構造を舞台として、電子や電子スピンといった単一粒子、分数量子ホール領域で現れる分数電荷準粒子、プラズモンやマグノンなどの電子やスピンの集団励起に注目して、これらの干渉性・電子相関・非平衡状態・非線形現象などの物理現象を明らかにすることを目的とした。このような多岐にわたる研究を総称して電子波束のダイナミクスと呼び、課題名に設定した。量子ダイナミクスの研究が進展している量子光学の知見を取り入れて低次元電子系のダイナミクスを研究することにより、高速波

束エレクトロニクスや量子情報技術への指針を得ることを目的とした。

具体的な内容は、実験研究として GaAs 系の量子ホールエッジ状態とナノ構造（量子ポイント接合や量子ドット）の融合による電子波束ダイナミクスを、理論研究では実験技術が確立していないトポロジカル材料系での電子波束ダイナミクスを中心として計画を立案した。その後の研究進展により、上記計画のほか、1 原子層薄膜であるグラフェンの電子波束実験、磁性体中のマグノン波束の理論を含めて研究を遂行することとした。

振り返って見ると、量子ホール系はトポロジカル物質でもあることから、本研究は、トポロジーによって保護されたエッジ状態の電子波束ダイナミクスにより、エッジ状態に現れる準粒子（分数電荷、カイラルプラズモン、カイラルマグノン）の物性を明らかにする研究であったと解釈できる。今後発展が見込まれるトポロジカル物質での電子波束のダイナミクスに関する先駆的な研究である。図 1 は、エッジ状態に現れる準粒子に関する本研究の内容を表す概念図である。

二次元電子系，グラフェン，トポロジカル系など

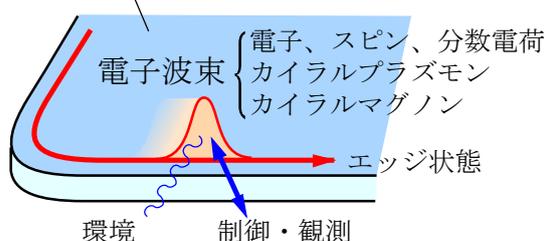


図 1 本研究の概念図

具体的な目標として下記の 4 項目の計画をたてて研究を行い、その後の研究進展により多くの成果を得るに至った。

(1) 電子波束の測定技術の確立

時間分解・周波数分解の電荷測定技術、波束のホモダイン検出技術、量子ドット分光器によるエネルギースペクトル測定技術、自己相関および相互相関の雑音測定による準粒子電荷や電子相関の測定技術、マッハツェンダー型干渉計などを開発し、計画していた 1 次・2 次の干渉測定技術を確立した。

(2) 高精度・短時間波束制御技術の確立

高速電界制御による電子波束の伝搬制御、プラズモン波束のガイディング・ルーティング技術、非線形性を用いた周波数逓倍・周波数混合素子の研究をおこない、計画内容とは若干異なる手法によりほぼ目標を実現した。

(3) 量子ホール状態の物性測定

量子ホールエッジ状態のカイラルプラズモン伝搬測定による電子間相互作用の理解、集積化したエッジ状態を用いた人工的朝永ラッティンジャー流体の非平衡状態に関する研究、局所的な分数量子ホール状態におけ

る分数電荷の励起過程に関する研究などをおこない、計画した内容よりも遥かに進展した物性を探求するに至った。

(4) 電子スピン波束の生成と制御

理論研究として、トポロジカル絶縁体のエッジ状態、磁性体のマグノン波束の伝搬に関する研究をおこなった。実験研究においても、母体原子の核スピン集団や結晶格子のフォノンなどの「環境」を制御する技術を確認し、電子スピンのコヒーレント制御に向けた要素技術を確認した。

研究開始当初は、研究室の立ち上げ期間にあったことから、研究成果を得るために時間を要し、中間ヒアリングでは研究の遅れが指摘された。しかし、装置・設備・技術を一から見直すことにより、独自の実験技術を確認し、その後の研究の加速によって総合的にはほぼ計画に沿った成果を得たと考えている。

3. 研究の方法

実験研究においては、素子作製と極低温での高周波伝導測定が研究の要となる。

素子作製では、分子線エピタキシー法による高電子移動度半導体ウエハーの作製と、電子ビームリソグラフィによる微細加工により、独自性の高い低次元電子系の素子を作製した。大面積グラフェンのパターンニングによるプラズモン素子を作製した。

極低温での高周波伝導測定では、独自性の高い技術を有し、極低温動作の低雑音電流増幅器の開発や、冷凍機内での高周波配線の最適化など実験技術を高めた。これらは、GaAs 系やグラフェンの実験に限らず、他の材料系にも展開可能である。

理論研究においては、実験技術が確立していない材料、トポロジカル絶縁体や人工周期構造を導入したマグノニック結晶におけるエッジ状態・波束力学の研究を行なった。

代表者・分担者間で、試料や技術の交換を頻繁に行い、討論を中心とした研究進捗会合を定期的に開催し、ディスカッションを活性化することにより、研究を推進した。

4. 研究成果

主な研究成果は以下のとおりである。

(1) 量子ホールエッジ状態のカイラルプラズモン

整数量子ホール領域の伝導は、相互作用のない 1 電子描像によって理解されることが多いが、非平衡電子状態を理解するためには相互作用を繰り込んだカイラルプラズモンとして理解すべきである。特にエッジ状態のような 1 次元系では、「ボゾン化」の理論により、電子描像とプラズモン描像が 1 対 1 に対応することが知られている。

本研究では、GaAs 系量子ホール状態の時間・周波数領域での電荷測定により、カイラ

ルプラズモンを生成・観測する手法を確立した。一連の研究は、エッジ状態のプラズモン速度の測定例として広く引用されている。

①量子ポイント接合による時間/周波数分解波束測定：量子ポイント接合の透過率をパルス状に変調することにより、波束の電荷量を時間/周波数分解で測定する技術を開発した。本研究を推進するために大きく寄与した技術である。[発表論文⑦⑧等]

②カイラルプラズモンの速度制御：周囲の静電的環境（遮蔽）の制御により、カイラルプラズモンの速度を大きく変調することに成功した。半導体表面の金属構造や、印加するゲート電圧によって、速度を1桁以上変化できることを示した。[発表論文⑥⑦等]

③カイラルエッジ状態のキャパシタンスモデル：低次元系は遮蔽が弱く、相互作用は長距離に及ぶ。高周波測定によって長距離相互作用を定量的に計測することに成功した。さらに、相互作用をキャパシタンスとして記述するモデルを提唱し、高周波プラズモン回路の設計指針を示した。[発表論文⑦]

④カイラルプラズモン干渉計：トポロジに守られたカイラルプラズモンは長いコヒーレント長を有する。ファブリペロー型、マッハツェンダー型の干渉計を実現し、超高周波での干渉計が安定に動作することを実証した。[発表論文⑦等、特許取得、論文準備中]

⑤非線形素子による周波数混合回路：量子ポイント接合の非線形伝導を利用して、カイラルプラズモンの非線形素子として機能することを示し、周波数乗倍回路、周波数混合回路を実証した。[Appl. Phys. Lett. 2012 掲載]

(2) 人工的朝永ラッティンジャー流体

複数の整数量子ホールエッジチャネルが結合した系によって、人工的な朝永ラッティンジャー流体を実現した。朝永ラッティンジャー流体は、多体系の厳密解を得ることができる可積分系であり、その特異な非平衡状態を実験的に明らかにすることに成功した。

占有率2のエッジ状態では、スピンの異なるチャネルが結合しスピン電荷分離を示す。さらに対向したエッジと結合を持たせることで、無磁場の量子細線と同様の双方向スピンの朝永ラッティンジャー流体を形成することができる。この系を人工的朝永ラッティンジャー流体と呼び、時間分解測定や量子ドット分光により、非平衡状態を明らかにした。これらの研究は、朝永ラッティンジャー流体の特異な伝導現象、顕著な非平衡量子状態の例として世界的に認知されつつある。

①電荷分断化現象の時間分解測定：朝永ラッティンジャー流体では、相互作用によって有効電荷が異なる値をとることが本質である。相互作用のある領域とない領域の境界では、有効電荷の差によって電荷分断化現象が

起こると考えられていたが、それを直接的に観測することは困難であった。我々は、カイラルプラズモン波束を用いて観測に成功した。図2に示すように、電荷波束の入射に対して、分断された複数の電荷波束が反射される様子の観測に成功し、相互作用領域の両端で生じた電荷分断化現象を時間領域測定で明らかにした。[発表論文④等、報道発表②]

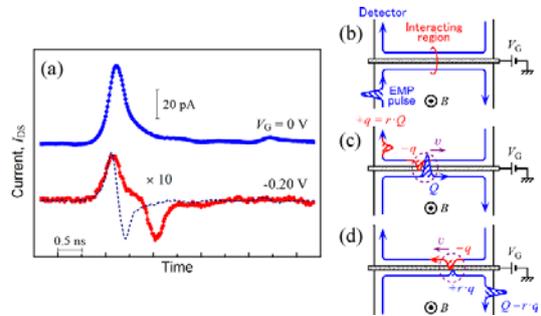


図2 人工的朝永ラッティンジャー流体の電荷分断化現象

②可積分系特有の非平衡定常状態の観測：相互作用する多体系は、環境との相互作用がなくとも、系は熱平衡状態に漸近すると考えられるが、厳密解のある可積分系では、無限の保存量を伴った準安定非平衡状態を示す場合がある。この準安定非平衡状態は、限られた系（冷却原子など）でしか観測されていなかった。我々は、双方向スピンの朝永ラッティンジャー流体を用いて、多くの保存量を有する準安定非平衡状態が存在することを実験的に検証した。

具体的には、量子ポイント接合から非平衡な電荷を注入すると、高温と低温の2つの温度をもつ電子集団が共存する特異な状態が発生することを見出した。これは、朝永ラッティンジャー流体モデルの準安定状態を示している。[論文投稿中]

(3) グラフェンのプラズモン伝導

1 原子層グラフェンのディラック電子系においても、非平衡状態を理解するためには、相互作用を繰り込んだプラズモンとして理解する必要がある。GaAs系と異なり、グラフェン端のハードウォールポテンシャルに起因したプラズモンモードは、THzに至る超高周波帯、電子・正孔共存系への発展が期待されている。本研究は、グラフェンプラズモンの先駆的な研究として世界的に注目されている。

①グラフェン端のカイラルプラズモン速度制御：我々は、大面積の試料が得られる4H-SiCの熱昇華によって作製されたグラフェンに注目し、量子ホール領域でのカイラルプラズモンの速度制御に成功した。測定系に起因する波形の歪を、系の伝達関数でデコンボリューションすることにより本質的な信号

を得る手法を開拓した。グラフェン上の金属ゲート電極や磁場の印加により、2桁以上の広範囲で速度を変調することに成功し、基本的なカイラルプラズモン特性を明らかにした。[発表論文⑥等、報道発表①]

②プラズモン伝送のガイディング・ルーティング：バンドギャップのないグラフェンでの伝導制御は応用上重要な問題である。しかし、プラズモン回路の設計により、プラズモンの導波路（ガイディング）によりチャネルを形成し、複数の導波路の切り替え（ルーティング）によるスイッチ動作が可能である。図3のように、グラフェン上のゲート電極により、ガイディング・ルーティング動作に成功した。[発表論文②]

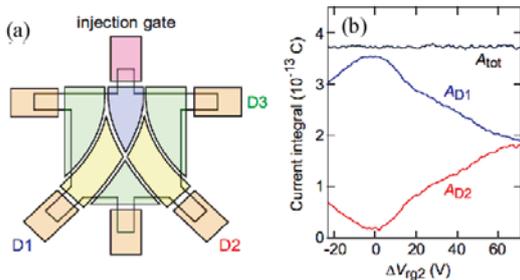


図3 グラフェンのプラズモン回路（ルーティング素子）

(4) 分数量子ホール領域に関する研究

分数量子ホール系での素励起は分数電荷であり、エニオン統計性や非アーベリアン統計性を示す粒子が存在する可能性がある。本研究では、高品質な量子ホール素子の開発による偶数分母の分数量子ホール状態（占有率 $5/2$ ）の研究や、相互相関雑音測定による分数電荷の生成過程を明らかにした。

①局所分数領域のショット雑音：整数量子ホール領域において、量子ポイント接合の近傍に形成される局所的な分数量子ホール状態を実現し、相互相関雑音測定によって分数電荷のトンネル過程を観測することに成功した。これは、整数エッジチャネルの間で、分数電荷のトンネル現象が発現するものであり、比較的高い温度まで安定に分数電荷が生成されることを示した。[発表論文①]

②偶数分母分数量子ホール状態の観測：GaAs/AlGaAs ヘテロ構造素子を作製し、高移動度2次元電子の分数量子ホール特性から電子温度を評価し、非アーベリアン統計粒子が期待されるランダウ占有率 $5/2$ の分数量子ホール状態が現れる条件を示した。

(5) 二重量子ドットの電子スピン相関

二重量子ドットでは、2電子のスピン相関を生成・検出することで注目されているが、母体元素の動的核スピン偏極の制御が課題となっていた。本研究では、スピン閉塞効果と動的核スピン偏極との関係を実験・理論の

両面からアプローチし、安定的な動的核スピン偏極を示す条件を明らかにした。

①核スピン環境のフィードバック制御：二重量子ドットにおけるパウリスピン閉塞や交換相互作用誘起スピン閉塞による動的核スピン偏極の条件を明らかにした。2つの量子ドットの核スピン環境を等しくするフィードバック条件を見出し、スピン操作への指針を示した。[発表論文③等、論文準備中]

②三重量子ドットの電荷再配置効果：3端子三重量子ドットの少数電子領域における伝導測定により、この系における電荷再配置効果を見出した。

(6) 表面弾性波フォノンによる共振器量子電気力学に関する研究

量子光学により発展した共振器量子電気力学の知見を、電子波束のダイナミクスに活かすため、結晶フォノン（音子）と電子系による新奇な共振器量子電気力学に関する研究を開始した。共振器のモード体積を桁違いに小さくできるため、超強結合領域など未開拓の領域に突入できる可能性がある。本研究では、干渉性の高い表面弾性波フォノンに注目し、フォノン共振器を実現し、二重量子ドットのフォノン支援遷移の観測に成功した。フォノン版共振器量子電気力学の創造に向けて注目されつつある。

①フォノン支援トンネル現象：周期的金属構造による表面弾性波フォノンの禁制帯を確認するとともに、フォノン共振器を作製した。共振器中の二重量子ドットにおけるフォノン支援トンネルを評価し、共振器効果の観測に成功した。[論文投稿中]

②スピン反転フォノン支援トンネル現象：スピン閉塞領域でのフォノン支援トンネル現象の観測に成功し、電子スピンとフォノンとの結合が存在することを見出した。スピン軌道相互作用や超微細相互作用を介した電子スピンとフォノンの結合を用いて、更なる発展性が期待される。[論文準備中]

(7) トポロジカル絶縁体のエッジ・表面状態の新奇物性の理論研究

トポロジカル絶縁体では、顕著なスピン軌道相互作用によって運動量とスピン状態がロックした特異なエッジまたは表面状態が現れる。こうしたエッジ・表面状態による新奇物性の理論的探索を行った。

①トポロジカル絶縁体のヘリカル表面状態について、（ギャップを開いた場合の）熱ホール効果、電流誘起スピン偏極、逆ファラデー効果など、複数の自由度がからんだ物性現象を予言した。[Phys. Rev. B 2011 に掲載]

②トポロジカル絶縁体での表面状態の混成は通常の状態とは質的に全く異なることを明らかにした。例えば、表面ディラック

クコーンのカイラリティの符号が異なるトポロジカル絶縁体を接合した界面では、特異なギャップレス（金属）状態が現れることを理論的に見いだした。通常はトポロジカル絶縁体同士の界面はギャップが開くため金属的にはならないが、これとは全く異なる結果である。このことは界面や超格子系において、通常物質とは異なる形でバンド構造が制御できることを示しており、相変化メモリ物質など具体的な物質への応用も議論されている。[発表論文⑤⑨等]

(8) 強磁性絶縁体中マグノンのトポロジカルエッジ状態に関する研究

電子系ではスピン軌道相互作用により多様な興味深い現象がもたらされる。本研究では磁性体の磁気モーメント間の双極子相互作用がスピン軌道相互作用とみなせることに着目し、強磁性絶縁体中のマグノンにおける新奇現象を理論的に探索した。双極子相互作用による静磁スピン波の熱ホール効果を理論的に予言した。さらに人工的に周期性を導入してマグノンバンドギャップができると、量子ホール系に類似したトポロジカルなエッジ状態が形成されることを理論的に見いだした。

①長波長の静磁スピン波についてマグノンバンド構造に起因するベリー曲率を定式化した。輸送現象を半古典論と線型応答理論とで扱うことにより、熱ホール効果を生み出すこと、強磁性薄膜に関しては、種々の静磁スピン波のうち前進体積波のみがこの効果を生み出すことが分った。[発表論文⑩等]

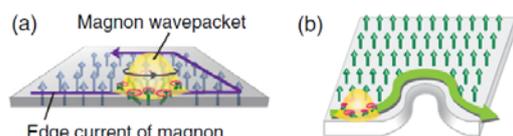


図4 マグノン波束の伝搬

②強磁性体に人工的に周期性を導入したマグノニック結晶について、ギャップを開いたときに最低バンドがゼロでないチャーン数（カイラルエッジ状態の本数）を持つ場合があることを示し、このエッジ状態はトポロジカルに安定であると考えられる。このエッジ状態に関して、スピン波のスプリッターや干渉計の提案を行った。こうした人工的な周期構造はさまざまなものが考えられ、今後の実験による検証が期待できる。[Phys. Rev. B 2013 に掲載]

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計31件)

- ① M. Hashisaka, T. Ota, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Shot-noise evidence of fractional quasiparticle creation in a local fractional

quantum Hall state", Phys. Rev. Lett. 114, 056802 (2015). 査読有

doi: 10.1103/PhysRevLett.114.056802

- ② N. Kumada, R. Dubourget, K. Sasaki, S. Tanabe, H. Hibino, H. Kamata, M. Hashisaka, K. Muraki, T. Fujisawa, "Plasmon transport and its guiding in graphene", New J. Phys. 16, 063055 (2014). 査読有

doi:10.1088/1367-2630/16/6/063055.

- ③ S. Sharmin, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Stable and unstable dynamics of Overhauser fields in a double quantum dot", Phys. Rev. B 89, 115315 (2014). 査読有

doi: /10.1103/PhysRevB.89.115315

- ④ H. Kamata, N. Kumada, M. Hashisaka, K. Muraki & T. Fujisawa, "Fractionalized wave packets from an artificial Tomonaga-Luttinger liquid", Nature Nanotech. 9, 177-181 (2014). 査読有 doi:10.1038/nnano.2013.312

- ⑤ R. Takahashi and S. Murakami, "Interfacial Fermi Loops from Interfacial Symmetries", Phys. Rev. Lett. 113, 256406 (2014). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevLett.113.256406

- ⑥ N. Kumada, S. Tanabe, H. Hibino, H. Kamata, M. Hashisaka, K. Muraki and T. Fujisawa, "Plasmon transport in graphene investigated by time-resolved electrical measurements", Nature Comm. 4, 1363 (2013). 査読有, doi:10.1038/ncomms2353

- ⑦ M. Hashisaka, K. Washio, H. Kamata, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Distributed electrochemical capacitance evidenced in high-frequency admittance measurements on a quantum Hall device", Phys. Rev. B 85, 155424 (2012). 査読有

doi: /10.1103/PhysRevB.85.155424

- ⑧ N. Kumada, H. Kamata, and T. Fujisawa, "Edge magnetoplasmon transport in gated and ungated quantum Hall systems", Phys. Rev. B 84, 045314 (2011) 査読有

doi: 10.1103/PhysRevB.84.045314

- ⑨ R. Takahashi and S. Murakami, "Gapless Interface States between Topological Insulators with Opposite Dirac Velocities", Phys. Rev. Lett. 107, 166805 (2011). 査読有

doi: 10.1103/PhysRevLett.107.166805

- ⑩ R. Matsumoto and S. Murakami, "Theoretical Prediction of a Rotating Magnon Wave Packet in Ferromagnets", Phys. Rev. Lett. 106, 197202 (2011). 査読有,

doi:10.1103/PhysRevLett.106.197202

[学会発表] (計146件)

- ① D. Imanaka, S. Sharmin, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Nuclear Overhauser effect on exchange-induced spin blockade in a two-electron double quantum dot", Int. Symp.

Quantum System and Nuclear Spin Related Phenomena (QSNS), Miyagi Zao Royal Hotel, Miyagi, Japan. (Feb. 18-20, 2015).

- ② J.C.H. Chen, R. Kosaka, M. Hashisaka, K. Muraki, T. Fujisawa, "Electron Transport in a Double Quantum Dot Induced by a Surface Acoustic Wave Cavity Mode", 32nd Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS2014), Austin, USA. (Aug. 10-15, 2014).
- ③ K. Washio, R. Nakazawa, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Non-Equilibrium Heating between Counter-Propagating Quantum Hall Edge Channels", 32nd Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS2014), Austin, USA. (Aug. 10-15, 2014).
- ④ M. Hashisaka, T. Ota, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Fractional Charge Tunneling through a Local Fractional Quantum Hall Region", 32nd Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS2014), Austin, USA (Aug. 10-15, 2014).
- ⑤ T. Fujisawa, "Plasmon wavepacket in edge channels of GaAs and graphene", Quantum Science Symposium ASIA-2013 Meeting, Tokyo, Japan (Nov. 25-26, 2013)
- ⑥ R. Shindou, J. Ohe, R. Matsumoto, S. Murakami, E. Saitoh, "Berry curvature, Hall effect, and Topological Phases of Magnetostatic Spin Waves", The 58th Annual Magnetism and Magnetic Materials, Denver, U.S.A. (Nov. 4-8, 2013).
- ⑦ S. Murakami, "Physics of Topological Insulators and Potential Applications to Phase-change Materials", 2013 MRS Spring Meeting, San Francisco, U.S.A. (April. 1-5, 2013).
- ⑧ H. Kamata, N. Kumada, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Time-resolved measurement of charge fractionalization in counter-propagating quantum Hall edge channels", 31st Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS 2012), Zurich, Switzerland (Jul 30 - Aug. 3, 2012).
- ⑨ N. Kumada, S. Tanabe, H. Hibino, H. Kamata, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Plasmon Transport in Graphene Investigated by Time-Resolved Measurement Using Nanoribbon", 31st Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS 2012), Zurich, Switzerland (Jul 30 - Aug. 3, 2012).
- ⑩ N. Kumada, S. Tanabe, H. Hibino, H. Kamata, M. Hashisaka, K. Muraki and T. Fujisawa, "Time-Resolved Transport Measurement in Graphene on SiC", Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), Tallahassee, USA (July 25-29, 2011).

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

名称：高周波素子

発明者：村木康二、熊田倫雄、藤澤利正、橋坂昌幸

権利者：日本電信電話(株)、東京工業大学

種類：特許

番号：特許第 5371053 号

出願年月日：平成 22 年 5 月 24 日

取得年月日：平成 25 年 9 月 27 日

国内外の別：国内

[その他]

- ・ホームページ (研究成果など)
<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/>
 - ・報道発表
- ① グラフェンを用いたプラズモンの伝搬制御を世界で初めて実証 ～電子の波を利用したナノ領域での回路の高速化、超低消費電力化へ前進～ (2013年1月15日)
 - ② 朝永-ラッティンジャー流体の励起素過程の観測に成功 ～プラズモン回路の集積化に道～ (2014年2月5日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤澤 利正 (FUJISAWA, Toshimasa)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：20212186

(2) 研究分担者

村木 康二 (MURAKI, Koji)
日本電信電話株式会社N T T物性研究所・量子電子物性部・主幹研究員
研究者番号：90393769

熊田 倫雄 (KUMADA, Norio)

日本電信電話株式会社N T T物性研究所・量子電子物性部・主幹研究員
研究者番号：30393771

村上 修一 (MURAKAMI, Shuichi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：30282685

(3) 連携研究者

橋坂 昌幸 (HASHISAKA, Masayuki)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：80550649

横山 毅人 (YOKOYAMA, Takehito)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：30578216