

令和元年6月11日現在

機関番号：34519

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05135

研究課題名(和文) 磁場中の2次元電子系におけるエッジ状態のダイナミクスとその応用

研究課題名(英文) Study of the dynamics of edge states in two-dimensional electron system under magnetic field and its application

研究代表者

福田 昭 (FUKUDA, Akira)

兵庫医科大学・医学部・准教授

研究者番号：70360633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：量子ホール状態に代表される磁場中の2次元電子系では、1次元エッジ状態やトポロジカル励起の研究に理想的であり、分数量子ホール状態において、核スピンの多様性が重要な役割を果たすことが分かってきた。本研究では、高移動度を持つGaAs量子井戸構造を用い、超低温・高磁場下での量子輸送現象測定により、動的核スピン偏極(DNP)後の量子ホール状態が極めて興味深い特異な量子状態であることが分かった。また、グラフェンにおいてもDNPを目指すべく研究を推進し、量子ホール状態において希ガス分子吸着が電気伝導に大きな影響を及ぼすこと、弱局在効果と普遍的電導度揺らぎが関連していること等新しい知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子ホール状態における核スピンはその拡張性や制御性の良さから量子計算機への応用が検討されているが、本研究成果はその実現に向けて一歩前進させたと考えられる。また、動的核スピンのダイナミクスに関する成果は、最近発展の著しいトポロジカル絶縁体の物理と相補的な研究発展が期待される。さらに、グラフェンにおける希ガス分子吸着効果の観測は、極めて高感度なガス・センサーとしての応用の可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Two dimensional electron system (2DES) in high magnetic field is an ideal system to study one dimensional edge state and topological excitation. In the fractional quantum Hall states (QHSs), nuclear spins play an important role for various physics. In this study, using a high-mobility GaAs quantum well sample, QHSs after dynamic nuclear spin polarization (DNP) turn out to be an extremely interesting novel quantum states. During investigation to perform DNP in 2DES of graphene, it is revealed that inert gas adsorption on graphene take effects on transport properties in QHS regime, and weak localization effect is highly related to the universal conductance fluctuation.

研究分野：低温・半導体物理学

キーワード：量子ホール効果 2次元電子系 動的核スピン偏極 エッジ状態 強磁場 超低温 グラフェン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 異種半導体接合界面あるいは量子井戸に形成される2次元電子系は、低次元系特有の物理現象が発現するため、最も注力されている研究分野である。超低温・高磁場下において、2次元電子系は量子ホール効果と呼ばれる特異な量子輸送現象を示す。
- (2) 量子ホール状態における電気伝導は、バルクの2次元電子系周辺に形成される1次元エッジ状態が担っており、エッジを流れる電子(カイラル・フェルミ粒子)が空間的に遠く離れたエッジ間でしか後方散乱を受けないことから、スピン輸送を伴う量子情報やスピントロニクス分野で注目を集めていた。
- (3) 2次元電子系を2枚近接して配置した2層2次元電子系においては、電子の持つスピン自由度に加えて、「層」の自由度(擬スピン自由度)が加わることにより、1層系では見られなかった、多彩な物理現象が展開されることが期待される。

2. 研究の目的

- (1) 電気伝導測定やマイクロ波による伝導応答の観測を行い、エッジ状態での電子の散乱機構とその動的変化過程、および関連するトポロジカルな励起状態とその生成・消滅機構を解明する。
- (2) エッジ状態の存在しないコルビノ電極と従来のホールバー形状とを同時に測定することにより、動的核スピン偏極(DNP)におけるエッジの効果을明らかにする。
- (3) 核スピンのDNPは、電子スピンの異なるドメイン間で電子スピン-核スピンのフリップ・フロップ散乱によって生じるとされているが、ドメイン構造自体がどのようなダイナミクスを示すのかについて明らかにする。
- (4) 電気伝導測定およびマイクロ波を用いることで、2層系も含めたグラフェン試料を製作し、¹³Cや吸着分子を付加したグラフェンでのDNPを目指す。

3. 研究の方法

- (1) 兵庫医科大学において、量子ホール効果測定を目指した強磁場・超低温環境の整備を行う。
- (2) 東京大学・物性研究所との共同研究で、ホールバー型及びコルビノ型併用測定可能な、高移動度GaAs半導体試料のデバイス化を行う。
- (3) 大阪大学・産業科学研究所との共同研究で、核スピン導入可能な単層および層間距離を制御した2層グラフェン素子の作製する。
- (4) 高移動度GaAs試料を用いた、 $\nu=2/3$ 分数量子ホール状態におけるDNPダイナミクスの測定を行う。
- (5) マイクロ波と電気伝導測定によるDNPを利用した量子ホール状態特有のトポロジカル励起の研究を行う。

4. 研究成果

- (1) GaAs系における $\nu=2/3$ 分数量子ホール状態における動的核スピン偏極によって励起された状態での磁気抵抗の温度依存性が、温度の増加に伴って抵抗値が減少する極めて特異な状態であることが分かった。
- (2) 単層グラフェンにおける弱局在効果と普遍的伝導度ゆらぎが、極めて相関していることが分かった。
- (3) グラフェンの量子ホール域での希ガスの分子吸着が電気伝導に及ぼす影響を詳細に調べた。
- (4) GaAs系における $\nu=2/3$ 分数量子ホール状態における動的核スピン偏極を様々な占有率で行ったところ、磁気抵抗の極大値が占有率に応じてシフトすることが分かった。
- (5) GaAs系において、 $\nu=2/3$ 分数量子ホール状態におけるスピン転移点を引き起こすと予想される磁場とは大きく異なる高磁場において、 $\nu=2/3$ と $\nu=3/5$ 量子ホール状態の中間領域において、電流誘起量子ホールプラトーを観測した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

① S. Tsuda, S. Mitani, Minh-Hai Nguyen, D. Terasawa, A. Fukuda, and A. Sawada, Resistance Peak Shift and Deviated Hall Plateau Driven by Dynamic Nuclear Polarization in Fractional Quantum Hall States, J. Phys. Soc. Japan, accepted, 2019.

② Akira Fujimoto, Christopher J. Perini, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Yoshiyuki Harada, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, and Eric M. Vogel, Disorder and Weak Localization near Charge Neutral Point in Ti-cleaned Single-Layer Graphene, Phys. Status Solidi B, 査読有, 2019, 1800541, 1-8, DOI: 10.1002/pssb.201800541.

③ Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Akira Fujimoto, Yasuhide Ohno, Yasushi Kanai, and Kazuhiko Matsumoto, Universal Conductance Fluctuation Due to Development of Weak Localization in

Monolayer Graphene, Phys. Status Solidi B, 査読有, 2019, 1800515, 1-7, DOI: 10.1002/pssb.201800515.

④ Y. Fujii, Y. Ishikawa, K. Ohya, S. Miura, Y. Koizumi, A. Fukuda, T. Omija, S. Mitsudo, T. Mizusaki, A. Matsubara, H. Yamamori, T. Komori, K. Morimoto and H. Kikuchi, Development of very-low-temperature millimeter-wave electron-spin-resonance measurement system, Appl. Mag. Reson., 査読有, 49, 2018, 783-801, DOI: 10.1007/s00723-018-1027-9.

⑤ Y. Ishikawa, K. Ohya, S. Miura, Y. Fujii, S. Mitsudo, T. Mizusaki, A. Fukuda, A. Matsubara, H. Kikuchi, T. Asano, H. Yamamori, S. Lee and S. Vasiliev, High-frequency electron-spin-resonance measurements on $Mn_xMg_{1-x}O$ ($x=1.0 \times 10^{-4}$) and DPPH at very low temperatures, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 969, 2018, 012111 1-6, DOI: 10.1088/1742-6596/969/1/012111.

⑥ A. Fukuda, D. Terasawa, A. Fujimoto, Y. Kanai, and K. Matsumoto, Magnetotransport of Monolayer Graphene with Inert Gas Adsorption in the Quantum Hall Regime, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 969, 2018, 012130 1-6, DOI: 10.1088/1742-6596/969/1/012130.

⑦ Yuya Ishikawa, Kenta Ohya, Yutaka Fujii, Akira Fukuda, Shunsuke Miura, Seitaro Mitsudo, Hidetomo Yamamori and Hikomitsu Kikuchi, Development of Millimeter Wave Fabry-Pérot Resonator for Simultaneous Electron-Spin and Nuclear Magnetic Resonance Measurement, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 査読有, 39, 2018, 387-398, DOI: 10.1007/s10762-018-0464-8.

⑧ Y. Ishikawa, K. Ohya, Y. Fujii, Y. Koizumi, S. Miura, S. Mitsudo, A. Fukuda, T. Asano, T. Mizusaki, A. Matsubara, H. Kikuchi and H. Yamamori, Development of a Millimeter-Wave Electron-Spin-Resonance Measurement System for Ultralow Temperatures and Its Application to Measurements of Copper Pyrazine Dinitrate, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 査読有, 39, 2018, 288-301, DOI: 10.1007/s10762-017-0460-4.

⑨ D. Terasawa, A. Fukuda, A. Fujimoto, Y. Ohno, and K. Matsumoto, Temperature dependence of universal conductance fluctuation due to development of weak localization in grapheme, Solid State Commun., 査読有, 267, 2017, 14-17, DOI: 10.1016/j.ssc.2017.09.002.

⑩ D. Terasawa, A. Fukuda, A. Fujimoto, Y. Ohno, Y. Kanai, and K. Matsumoto, Relationship between conductance fluctuation and weak localization in grapheme, Phys. Rev. B, 査読有, 95, 2017, 125427 1-6, DOI: 10.1103/PhysRevB.95.125427.

⑪ Shibun Tsuda, Minh-Hai Nguyen, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, and Anju Sawada, Negative magnetoresistance temperature dependence induced by current-pumped nuclear spin polarization at the $\nu = 2/3$ quantum Hall state, Phys. Rev. B, 査読有, 93, 2016, 125426 1-7, DOI: 10.1103/PhysRevB.93.125426.

[学会発表] (計 25 件)

① 福田昭, 寺澤大樹, 佐々木豊, 増田貴史, 平山祥郎, M. B. Santos, InSb 系量子ホール効果における高次ランダウ準位でのスピン転移, 第 17 回 京都大学物性科学センター講演会・研究交流会, 2019 年 02 月 18 日~2019 年 02 月 18 日, 京都大学百周年時計台記念館 国際交流ホール (京都府京都市) .

② 寺澤大樹, 福田昭, 藤元章, 佐々木豊, 谷口尚, 渡邊賢司, 塚越一仁, 層間距離を制御した 2 層系グラフェンデバイスの開発とその系に現れる物理, 第 17 回 京都大学物性科学センター講演会・研究交流会, 2019 年 02 月 18 日~2019 年 02 月 18 日, 京都大学百周年時計台記念館 国際交流ホール (京都府京都市) .

③ Akira Fujimoto, Christopher Perini, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Shigehiko Sasa and Eric Vogel, Disorder and Weak Localization near Charge Neutral Point in Ti-cleaned Single-Layer Graphene, 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2018), 2018年07月29日～2018年08月03日, Corum (Montpellier, France).

④ Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Akira Fujimoto, Yasuhide Ohno, Yasushi Kanai and Kazuhiko Matsumoto, Universal Conductance Fluctuation due to development of Weak Localization in grapheme, 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2018), 2018年07月29日～2018年08月03日, Corum (Montpellier, France).

⑤ Akira Fukuda, Daiju Terasawa, Yutaka Sasaki, Yoshiaki Hashimoto and Shingo Katsumoto, Current-induced mixed quantum Hall plateau in the fractional quantum Hall regime, 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2018), 2018年07月29日～2018年08月03日, Corum (Montpellier, France).

⑥ 藤元章, 上間康司, Christopher Perini, 寺澤大樹, 福田昭, 佐々誠彦, Eric Vogel, チタンクリーニングされた単層グラフェンの電荷中性点付近の R_{xx} , R_{xy} の温度依存性, 日本物理学会第73回年次大会, 2018年03月22日～2018年03月25日, 東京理科大学野田キャンパス (千葉県野田市) .

⑦ 福田昭, 寺澤大樹, 佐々木豊, 橋本義昭, 勝本信吾, 分数量子ホール状態における電流誘起量子ホールプラトー, 日本物理学会第73回年次大会, 2018年03月22日～2018年03月25日, 東京理科大学野田キャンパス (千葉県野田市) .

⑧ 福田昭, 寺澤大樹, 佐々木豊, 橋本義昭, 勝本信吾, 高磁場での分数量子ホール状態における電流誘起混合量子ホール状態, 第16回 京都大学物性科学センター講演会・研究交流会, 2018年02月19日～2018年02月19日, 京都大学百周年時計台記念館 (京都府京都市) .

⑨ A. Fukuda, D. Terasawa, Y. Sasaki, Y. Hashimoto, and S. Katsumoto, Dynamical mechanisms and role of the edge states on the nuclear spin polarization in the $\nu=2/3$ quantum Hall states. International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2017), 2017年09月10日～2017年09月13日, Miyagi-Zao Royal Hotel(Zao, Miyagi).

⑩ A. Fukuda, D. Terasawa, A. Fujimoto, Y. Kanai and K. Matsumoto, Magnetotransport of the Monolayer Graphene Adsorbed by the Inert Gas In The Quantum Hall Regime, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT-28), 2017年08月09日～2017年08月16日, The Swedish Exhibition and Congress Centre (Gothenburg, Sweden).

⑪ A. Fukuda, S. Tsuda, D. Terasawa and A. Sawada, Electron Spin Domain Dynamics and the Numerical Simulations in the $\nu = 2/3$ Fractional Quantum Hall State, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT-28), 2017年08月09日～2017年08月16日, The Swedish Exhibition and Congress Centre (Gothenburg, Sweden).

⑫ 藤元章, 長尾祥吾, 三木孝浩, 寺澤大樹, 福田昭, 太田椋也, 大東隆文, 小山政俊, 原田義之,

神村共住, 佐々誠彦, 矢野満明, 酸化インジウムナノ粒子を表面吸着させたグラフェンの電気特性, 2017年03月17日~2017年03月20日, 大阪大学(大阪府豊中市).

⑬ 福田昭, 寺澤大樹, 佐々木豊, 橋本義昭, 勝本信吾, 量子ホール状態における電流誘起動的核スピン偏極ダイナミクス, 第15回 京都大学物性科学センター講演会・研究交流会, 2017年02月20日~2017年02月20日, 京都大学(京都府京都市).

⑭ 寺澤大樹, 福田昭, 藤元章, 大野恭秀, 金井康, 松本和彦, グラフェンにおける伝導度ゆらぎの磁場依存性, 日本物理学会2016年秋季大会, 2016年09月21日~2016年09月24日, 金沢大学(石川県金沢市).

⑮ D. Terasawa, S. Norimoto, T. Arakawa, M. Ferrier, A. Fukuda, K. Kobayashi, and Y. Hirayama, Conductance quantization and shot noise in a tunnel-coupled double row quantum point contact, The 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS-9), 2016年08月08日~2016年08月11日, Kobe International Conference Center (Hyogo, Kobe).

⑯ A. Fukuda, D. Terasawa, Y. Kanai, and K. Matsumoto, Monolayer graphene magnetotransport modified by the inert gas adsorption in the quantum Hall regime, The 22nd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-22), 2016年07月25日~2016年07月29日, Jozankei View Hotel (Hokkaido, Sapporo).

⑰ 藤元章, Corey Joiner, 寺澤大樹, Christopher Perini, 福田昭, Eric Vogel, トンネル絶縁膜をはさんだ2層グラフェンの電気伝導, 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年03月19日~2016年03月22日, 東北学院大学(仙台市).

⑱ 福田昭, 津田是文, Nguyen Minh-Hai, 寺澤大樹, 澤田安樹, $\nu=2/3$ 量子ホール状態の動的核スピン偏極と数値シミュレーション, 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年03月19日~2016年03月22日, 東北学院大学(仙台市).

⑲ 寺澤大樹, 福田昭, 藤元章, 大野恭秀, 松本和彦, 単層グラフェンにおける伝導度ゆらぎと弱局在の関係, 第14回 京都大学 低温物質科学研究センター講演会・研究交流会, 2016年02月19日~2016年02月19日, 京都大学(京都市).

⑳ 福田昭, 寺澤大樹, 佐々木豊, 橋本義昭, 勝本信吾, 分数量子ホール状態における動的核スピン偏極ダイナミクス, 第14回 京都大学 低温物質科学研究センター講演会・研究交流会, 2016年02月19日~2016年02月19日, 京都大学(京都市).

㉑ 福田昭, 量子ホール系における動的核スピン偏極(DNP)の抵抗検出, 第11回量子スピン系研究会, 2016年01月29日~2016年01月30日, 福井大学(福井市).

㉒ 寺澤大樹, 福田昭, 藤元章, 大野恭秀, 松本和彦, グラフェンにおける伝導度ゆらぎの温度依存性, 日本物理学会2015年秋季大会, 2015年09月16日~2015年09月19日, 関西大学(西宮市).

㉓ Akira Fujimoto, Corey A. Joiner, Yuxuan Jiang, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Zhigang Jiang, and Eric M. Vogel, Temperature and Gate Voltage Dependence of Weak Localization Effect in Ti-Cleaned Single-Layer Graphene, 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), 2015年07月26日~2015年07月31日, Sendai International Center(Sendai).

㉔ Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Akira Fujimoto, Yasuhide Ohno, and Kazuhiko Matsumoto

Universal conductance fluctuation and intervalley scattering in grapheme, 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), 2015年07月26日～2015年07月31日, Sendai International Center(Sendai).

②⑤ Akira Fukuda, Daiju Terasawa, Akira Fujimoto, Yasuhide Ohno, and Kazuhiko Matsumoto, Thermal Effect on Relationship between Weak Localization and Universal Conductance Fluctuation in Monolayer Graphene, 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), 2015年07月26日～2015年07月31日, Sendai International Center(Sendai).

[その他]

ホームページ等

兵庫医科大学 物理学

<http://www.hyo-med.ac.jp/faculty/course/physics.html>

researchmap

<https://researchmap.jp/read0160947/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：寺澤 大樹

ローマ字氏名：(TERASAWA, daiju)

所属研究機関名：兵庫医科大学

部局名：医学部

職名：助教

研究者番号（8桁）：90589839

研究分担者氏名：佐々木 豊

ローマ字氏名：(SASAKI, Yutaka)

所属研究機関名：京都大学

部局名：理学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：60205870

※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、研究者個人に帰属されます。