

「トポロジカルエレクトロニクス」

平成21年度実施報告書

研究代表者 樽茶清悟

東京大学大学院工学系研究科・教授

1. 研究実施の概要

平成 21 年度は、本プロジェクトの主たる目的(スピン軌道相互作用、トポロジカル絶縁体、非局所エンタングラーの電氣的制御の実現)に向けて、主に実験、理論の準備を行った。平成 22 年度以後の計画遂行へ向けて、順調に研究をスタートした状況にある。各グループの研究項目の実施概要は以下の通り。

1. 電子スピンのコヒーレント操作と非局所エンタングルメント制御(樽茶グループ樽茶班)

InAs 量子ドット中の電子スピンのコヒーレント制御を行うための実験準備として、スピン軌道相互作用を利用した電場駆動型 ESR 研究で使用する高周波対応の素子の設計とプロセス技術の点検、スピン軌道相互作用の電氣的制御の基礎実験を行う。また、非局所エンタングラー作成の準備として、グラフェンや InAs 量子ドットと金属との接触抵抗の評価や表面弾性波発生のための技術を立ち上げる。

2. トポロジカルエレクトロニクスの理論(樽茶グループ永長班)

トポロジカル絶縁体表面で超伝導体との近接効果を通じて現れるマヨラナ粒子の物理的性質について、粒子間の相互作用効果も含めて理論的に検討する。

3. 永久スピン旋回とベリー位相の電場制御(新田グループ)

永久スピン旋回状態とベリー位相制御の実験に向けた半導体ヘテロ構造の設計、素子作製プロセスの最適化と、面内回転磁場測定系の立ち上げを行う。

4. 半導体量子構造におけるスピン流の生成・検出と電子・核スピンドYNAMIKSの解明(大野グループ)

GaAs/AlGaAs および InAs/GaSb/AlSb をベースとする量子ナノ構造を作製するための基盤技術として、高品質半導体量子構造を作製するための分子線エピタキシ装置の整備と成膜を行う。また、スピン流の光検出を高感度・高エネルギー分解能で行うための顕微カー回転測定システムの構築・整備を進める。

2. 研究実施体制

グループ名	研究代表者又は 主たる共同研究者氏名 ¹⁾	所属機関・部署・役職名 ²⁾	研究題目 ³⁾
樽茶グループ	樽茶 清悟	東京大学・大学院工学系研究科物理工学専攻・教授	電子スピンのコヒーレンス・エンタングルメント操作とトポロジカルエレクトロニクスの理論
新田グループ	新田 淳作	東北大学・大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻・教授	永久スピン旋回とベリー位相の電場制御
大野グループ	大野 裕三	東北大学・電気通信研究所・准教授	半導体量子構造におけるスピン流の生成・検出と電子・核スピンダイナミクスの解明

3. 研究実施内容

1. 電子スピンのコヒーレント操作と非局所エンタングルメント制御(樽茶グループ樽茶班)

InAs 量子ドット試料を用いて、近藤共鳴伝導度ピークの分裂からスピン軌道相互作用エネルギーを評価することに成功し、これまでの励起スペクトルによる評価と矛盾しない結果を得た。現在サイドゲートによるスピン軌道相互作用エネルギーの制御に取り組んでいる。また、InAs 量子ドットに GHz 帯域の高周波を印加するための素子検討と測定系の構築を行った。グラフェン素子に関しては、金属電極との接触抵抗を再評価した上で超伝導電極を接合させた試料の作成に取りかかった。また、表面弾性波 (SAW) の技術を立ち上げ、空乏化した一次元チャネルを伝播する SAW 電流が量子化する様子を確認した。

2. トポロジカルエレクトロニクスの理論(樽茶グループ永長班)

今年度は2カ月しか研究期間がないので、研究準備に注力した。具体的には、PC パソコンと計算機ソフトウェア(VASP)の購入・インストールを行い、電子状態計算の環境整備に努めた。この他、トポロジカル超伝導体の試料端に現れる1次元マヨラナフェルミオンについての理論解析を進めた。特に、時間反転対称性が破れていないヘリカル超伝導体におけるヘリカルマヨラナフェルミオンのトンネル輸送現象、および不純物スピンとの近藤結合について、繰り込み群を用いた解析を行った。その結果、マヨラナフェルミオンが「実フェルミオン」であることから生じる特異な量子干渉現象が存在することを突き止め、しかもそれがフェルミオン間の多体相互作用によって本質的な影響を受けることを見出した。

3. 永久スピン旋回とベリー位相の電場制御(新田グループ)

永久スピン旋回とベリー位相の電場制御の実現を目指して、これらの実験を可能とする半導体ヘテロ構造の設計と、面内回転磁場測定系の立ち上げを行った。スピン緩和の抑制された永久スピン旋回状態は、Rashba スピン軌道相互作用 α と Dresselhaus スピン軌道相互作用 β を等しくする必要がある。そこで $k \cdot p$ 摂動法で Rashba スピン軌道相互作用を理論的に評価し、ゲート電圧によって制御可能な範囲で Dresselhaus スピン軌道相互作用と等しくすることが可能な半導体ヘテロ構造の設計を試みた。InGaAs/InAlAs 系二次元電子ガスでは、キャリア供給層を InGaAs の上下2層に配置することにより、

Rashba スピン軌道相互作用を小さくするため対称な量子井戸構造にすることにより可能であることがわかった。GaAs/AlGaAs 系については今後も検討を続けていく。また、原子層堆積装置(ALD)を用いてゲート酸化膜の最適化を図り Rashba スピン軌道相互作用のゲート電場変調範囲の拡大化を図った。これまでのスパッタで作製した SiO₂ 膜に比べ、ALD を用いて作製した誘電率の高いアルミ酸化膜 (Al₂O₃)により、Rashba スピン軌道相互作用のゲート電場感度が大きく改善されることを確認した。

これまでレーゲンスブルグ大学と共同で提案した α/β の比をパラメタフィットすることなく求める測定方法は、準一次元細線構造において Rashba スピン軌道相互作用と Dresselhaus スピン軌道相互作用が作る有効磁場と外部磁場が平行になる面内磁場の角度が重要となる。そこで提案する測定方法を確立するため、準一次元細線の面内で磁場方向の回転制御が可能な測定系の立ち上げを図った。現在面内角度の精度は4度程度であるが、今後は面内磁場の回転角度の制御性を向上させるため新たな試料ホルダーを設計する。

4. 半導体量子構造におけるスピン流の生成・検出と電子・核スピンドYNAMIKSの解明(大野グループ)

近年、初めて量子スピンホール効果が観測されたHgTe/CdTe 系と比較してよりデバイス応用に適していると考えられるタイプII のInAs/GaSb/AlSb 量子井戸構造において、量子スピンホール絶縁相が出現することが理論的に示された。また、GaAs/AlGaAs量子構造においては、面方位を(110)面とすると2次元電子系に特異なスピン軌道相互作用が発現する。さらに、(311)A基板上に作製したGaAs/AlGaAsヘテロ構造では、よりスピン軌道相互作用の大きい2次元正孔ガスが形成され、スピン軌道相互作用に起因するスピン流生成・スピン制御が期待される。今年度は、これらをベースとする量子ナノ構造を作製するための基盤となる高品質半導体量子構造を作製するため、残留ガス分析計などを導入し分子線エピタキシ装置の整備を行った。また、レーゲンスブルグ大との共同研究に使用する試料の構造設計について意見交換を行った。さらに、スピン流および核スピンコヒーレンスの光検出を高感度・高エネルギー分解能で行うため、音響光学変調器や高安定cwチタンサファイアレーザーを導入し(顕微)カー回転測定システムの構築・整備を進めた。

以上