

「トポロジカルエレクトロニクス」

平成22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

樽茶グループ

電子スピンのコヒーレント制御では、スピン軌道相互作用の電氣的制御と、高周波光子介在トンネルの観測に成功した。また、主に、InAs 量子ドット、グラフェン、表面弾性波を用いたエンタングラーのデザインと作成を行った。

永長グループ

スピン軌道相互作用による磁性と量子輸送現象の相関について、電荷を持つスピン構造や電流誘起磁化反転の理論を構築した。トポロジカル絶縁体と超伝導接合におけるアンドレーフ反射、ジョセフソン効果の理論を発展させた。

新田グループ

幾何学的にコヒーレンスや量子性が保証された状態として、永久スピン旋回状態とベリー位相に着目し、トポロジカルエレクトロニクスの基礎となるゲート電場による位相コヒーレンス制御方法を確立する。

大野グループ

平成 22 年度は、分子線エピタキシ装置の整備を行い、成膜・供給の準備を完了した。また、歪と核四重極相互作用およびコヒーレンス時間との関連について研究が進捗し学会・論文発表を行った。平成 23 年度は当初計画どおり研究を推進する。

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	所属機関・部署・役職名	研究題目
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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 ・スピン軌道相互作用を利用した量子ドット電子スピンのコヒーレント制御 ・非局所エンタングラー
永長グループ	永長 直人	東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻・教授	<ul style="list-style-type: none"> ・スピン軌道相互作用と量子輸送現象の理論 ・トポロジカル絶縁体を用いたスピントロニクス理論 ・トポロジカル超伝導体とマヨラナフェルミオンの理論
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	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・高品質 GaAs/AlGaAs および InAs/GaSb/AlSb 量子構造の成膜・供給 ・顕微カー回転・分光システムによる高移動度2次元電子系のスピンダイナミクスの観測 ・半導体量子構造における歪とスピン軌道相互作用および核スピンコヒーレンスとの関連の解明

3. 研究実施内容

●樽茶グループ

スピン軌道相互作用：本研究では、電場による電子スピンコヒーレント操作の実現にスピン軌道相互作用を利用する。InAs 量子ドットはスピン軌道相互作用の強い材料であるが、これまで量子ドットでのスピン軌道相互作用の電氣的制御は実現されていない。スピン軌道相互作用により、軌道量子数とスピンの異なる2つの状態が縮退する場合、混成が生ずる。この現象を近藤共鳴の分裂として観測し、その分裂幅からスピン軌道相互作用の大きさを正確に算出することに成功した。さらに InAs ドットに近接するサイドゲートに電圧を印加するとともに、近藤共鳴の分裂幅が変化することを見出した。これによりスピン軌道相互作用エネルギーの電氣的制御に成功した。これは閉じ込めポテンシャルの変化に伴い、2つの混成軌道状態の波動関数の重なり程度が変わるためと考えている。この成果は、スピン軌道相互作用を利用した高性能量子ビットの開発において重要である。また、スピン軌道相互作用を利用した

スピン量子ビット実現に向け、高周波(<20GHz)を印加し、光子介在トンネルを観測することに成功した。これにより、高性能な電子スピン量子ビットへの設計指針を得た。

非局所エンタングラー:

主に InAs 量子ドット、グラフェン、表面弾性波を用いたエンタングラーのデザインと作製を行った。InAs 量子ドットのエンタングラーについては、当初の予定を変更し、より作製が容易な二つの量子ドットに共通の2つの超伝導電極を取り付けた構造を作製し、その電気伝導を調べた。そして、両方の量子ドットが共鳴条件にあるときに、超伝導電流が回復する様子を観察した。グラフェンのエンタングラーに関しては、様々な電極の取り付けを試したが、グラフェン-通常金属間の接合が良好だったのに対し、グラフェン-超伝導電極間の良好な接合はまだ得られていない。また、同時にグラフェン試料の不純物散乱による影響を抑えるために、架橋構造の作製などに取り組んだ。表面弾性波のエンタングラーについては、試料構造のデザインと作製を終え、セットアップの改善、特に新しい高周波対応チップキャリアの作製や冷凍機内部の配線に取り組んだ。

永長グループ

① スピン軌道相互作用と量子輸送現象の理論

スピン軌道相互作用が量子輸送現象と磁性の相関へ及ぼす影響を理論的に探究した。磁気輸送現象および、伝導電子がスピンのダイナミクスに与える影響を、乱れの効果、空間変調磁気構造、などを考慮に入れて考察した。その結果、従来の50倍にもなる巨大な電流誘起磁化反転効果、角度依存する巨大 Gilbert 減衰効果、電荷を持つ磁壁構造など、スピン軌道相互作用がないときには起こりえない種々の新奇な現象・効果を予言することができた。また、時間に依存するスピン軌道相互作用を用いて、電場による量子スピンポンピング、量子ドットにおける量子ビットの電場制御などの理論を構築した。これらは効果の本質が、スピン演算子およびスピン軌道相互作用の成分間の非可換性が、時間依存性を通じて現れることを明らかにした。

② トポロジカル絶縁体を用いたスピントロニクス理論

トポロジカル絶縁体上の超伝導と強磁性体との接合を、異方的ペアリング状態について調べた。まず p 波超伝導体とトポロジカル絶縁体の間に、近接効果が起こらないことを示した。次に s 波、d 波超伝導体の場合には接合部分に現れる Majorana フェルミオンのエッジ状態がアンドレーフ反射を通じてどのようにコンダクタンスに現れるかを、電圧の関数として計算した。d 波超伝導の場合は、強磁性体の磁化がない場合（つまり非磁性体の場合）には、分散を持たないゼロエネルギー状態が発生し、これが磁化によって分散を持つようになる。一方、s 波超伝導体の場合には、非磁性体との接合では存在しなかった Majorana エッジチャンネルが磁化とともに発生することを見出した。また、このことがコンダクタンスの電圧依存性にどのように現れるかを明らかにした。

●新田グループ

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 の等しい条件で実現される。これまでレーゲンスブルグ大学との共同研究により、 α/β をパラメータフィットすることなく求める測定方法(Phys. Rev. Lett. **101**, 266401 (2008))を提案してきた。この新規な手法は、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面内外部磁場が平行になる角度が重要となる。そこで、InGaAs 二次元電子ガスを用いた細線構造の作製条件を最適化するとともに、面内磁場回転可能な試料ホルダーを設計し、その測定系をほぼ

立ち上げた。Dresselhaus スピン軌道相互作用は物質固有のパラメータであるにもかかわらず、これまでの実験では大きなばらつきがあり、まず・を正確に見積もることが重要となる。そこで InGaAs の膜厚を系統的に変化させた試料を作製し、我々の磁気輸送特性と比較するためレーゲンスブルグ大学 S. Ganichev グループに磁気光学測定を依頼した。

スピンベリ一位相は、スピン軌道相互作用が作る有効磁場が作るブロッホ球上の立体角によって与えられる。我々は、これまでゲート電場によって制御可能な Rashba スピン軌道相互作用を有する InGaAs ヘテロ構造を用いてリング構造を作製しスピン干渉効果を実験的に検証した。今回、このスピン干渉デバイスに面内磁場を印加することにより、スピン干渉の位相がシフトすることを観測することに成功した。この位相がシフトは Rashba スピン軌道相互作用の作る有効磁場と面内磁場によりスピンベリ一位相が変調されたものと考えられる。より定量的な解析と理論的な裏付けをおこなうため、永長グループと共同で解析を開始した。

スピンホール効果は、運動量空間に現れる磁場に相当する場がベリ一位相を通じてスピン流に及ぼす効果として理解される。スピンホール効果を電氣的に検証するため、レーゲンスブルグ大学 D. Weiss グループと共同で GaMnAs/GaAs スピンエサキトンネル構造を作製し GaMnAs から GaAs への電子スピン注入が可能であることを確認した。また、スピン注入源となる GaMnAs 細線は細線方向により一軸磁気異方性の大きさを変調可能であることを実験的に見だし共著の論文として投稿した。

●大野グループ

平成22年度は、

1. 高品質 GaAs/AlGaAs および InAs/GaSb/AlSb 量子構造の成膜・供給
2. 顕微カー回転・分光システムによる高移動度 2次元電子系のスピンドYNAMIXの観測
3. 半導体量子構造における歪とスピン軌道相互作用および核スピンコヒーレンスとの相関の解明をマイルストーンとして研究を遂行してきた。

1. については、分子線エピタキシ装置（2台）の予期せぬ故障と、保守作業が予定より遅延したことにより、これらを整備することに時間が費やされた。年度終盤においてこれらの整備がほぼ完了し、成膜が可能となった。今後(110)面および(311)A面方位のGaAs/AlGaAs系積層構造の供給を進める予定である。InAs/GaSb/AlSb系ヘテロ構造については、担当者（大谷）が海外留学のため一時中断の状況である。こちらについては、次年度にむけ人的配置を検討し成膜・供給できる体制を整備する予定である。

2. については、新規に購入したTi:Al₂O₃レーザーを立上げ、顕微カー回転・分光システムの整備を行った。本システムを用いて、GaAs/AlGaAs高移動度2次元電子上に形成したポイントコンタクトによる電流誘起スピン分極と2次元電子中へのスピン伝搬についてその光学的検出を行った。本研究成果については現在取り纏め中であり、論文投稿準備を進めている。なお、前準備として実施したGaAs/AlGaAs量子井戸構造における高移動度2次元電子に作用する内部有効磁場の光学的評価をおこなった[1]。

3. については、核四重極分裂幅と核スピン位相緩和時間の関係を明らかにした[2]他、半導体量子構造内部における歪による電場勾配を角度分解光検出核磁気共鳴より定量的に明らかにし、その大きさや起源、および磁気共鳴曲線の線幅からコヒーレンス時間との相関について考察をおこなった。本成果についても、現在論文投稿準備中である。

4. 原著論文発表

- [1] S. Takahashi, R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, S.

- Tarucha, Large Anisotropy of the Spin-Orbit Interaction in a Single InAs Self-Assembled Quantum Dot, *Phys. Rev. Lett.* 104, 246801 (2010), 2010.06.14
- [2] Y. Kanai, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Tarucha, Electrical control of Kondo effect and superconducting transport in a side-gated InAs quantum dot Josephson junction, *Phys. Rev. B* 82, 054512 (2010), 2010.08.11
- [3] G. Allison, A. Oiwa, S. Kumar, D. P. DiVincenzo, M. Ketchen, K. Hirakawa, H. Takayanagi, S. Tarucha "A Novel Spin Based Qubit in Quantum Dots Coupled to a Superconducting Resonator" *J. Phys: Conf. Ser.* 245, 012024 (2010), 2010.09.20
- [4] 高橋駿、R. S. Deacon, 吉田勝治,大岩颯,柴田憲治,平川一彦,都倉康弘,樽茶清悟,“単一 InAs 自己形成量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の異方性” *固体物理 Vol. 45*, 497 (2010)
- [5] P. A. Maksym, M. Roy, M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, S. Tarucha and H. Aoki, “Proposal for a magnetic field induced graphene dot”, *Journal of Physics: Conference Series* 245, 012030 (2010)
- [6] 山本 倫久, Monica F. Craciun, Saverio Russo, Alberto F. Morpurgo, 樽茶 清悟, “3 層グラフェンの電気伝導とバンド構造”, *固体物理特集号 45*, 581 (2010)
- [7] M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto and S. Tarucha, “Physics and applications of double gated graphene devices”, *Nano today* (accepted)
- [8] Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, Y. Tokura, K. Hirakawa and S. Tarucha, “Spin-orbit interaction detection using Kondo effect in single self-assembled InAs quantum dots”, *AIP Conference Proceeding Series for 30th International Conference on the Physics of Semiconductors* (accepted)
- [9] J.Linder, Y.Tanaka, T.Yokoyama, A.Sudbø, and N.Nagaosa, Interplay between, superconductivity and ferromagnetism on a topological insulator, *Phys. Rev. B* 81, 184525 (2010)
- [10] Y.Avishai, D. Cohen, and N. Nagaosa, Purely Electric Spin Pumping in One Dimension, *Phys. Rev. Lett.* 104, 196601 (2010)
- [11] T. Yokoyama, J.D. Zang, and N. Nagaosa, Theoretical study of the dynamics of magnetization on the topological surface, *Phys. Rev. B* 81, 241410(R) (2010)
- [12] K.Nomura and N. Nagaosa, Electric charging of magnetic textures on the surface of a topological insulator, *Phys. Rev. B* 82, 161401(R) (2010)
- [13] A. Shitade, M. Ezawa, and N. Nagaosa, Manipulation of two spin qubits in a double quantum dot using an electric field, *Phys. Rev. B* 82, 195305(2010)
- [14] T. Takahashi, S. Matsuzaka, Y. Ohno, and H. Ohno, “Optical detection of zero-field spin precession of high mobility two-dimensional electron gas in a gated GaAs/AlGaAs quantum well,” *Physica E* 42, 2688 (2010).
- [15] J. Ishihara, M. Ono, G. Sato, S. Matsuzaka, Y. Ohno and H. Ohno, “Magnetic Field Dependence of Quadrupolar Splitting and Nuclear Spin Coherence Time in a Strained (110)GaAs Quantum Well,” to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.*
- [16] M. Kohda, J. Ogawa, J. Shiogai, F. Matsukura, Y. Ohno, H. Ohno, and J. Nitta, “Width and

temperature dependence of lithography-induced magnetic anisotropy in GaMnAs wires”,
Physica E 42, 2685 (2010).

- [17] *J. Shiogai, D. Schuh, W. Wegscheider, M. Kohda, J. Nitta, and D. Weiss, “Magnitude control of lithography-induced uniaxial anisotropy in thin (Ga,Mn)As wires”, Appl. Phys. Lett. 98, 083101 (2011) (accepted) 相手国との共著論文

レーゲンスブルグ大学と共同で、半導体へのスピン注入源となる磁性半導体 GaMnAs 細線の細線方向により一軸磁気異方性の大きさを変調可能であることを実験的に見出した。これは、ベリー位相に起因するスピントラップ効果の電気的な検出に重要な知見を提供する。

5. 受賞等

新田 G

Y. Kunihashi, Young Poster Award, The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors

好田 誠、第 50 回 本多記念会 原田研究奨励賞 2010年7月16日

以上