

戦略的国際科学技術協力推進事業
日本－ドイツ研究交流
研究課題「磁性半導体構造を有する人工原子」

研究終了報告書

研究交流期間 平成19年12月～平成23年3月

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・交流の目的

本研究は、トンネル伝導の量子極限における磁氣的現象や電子スピン現象を探究することを目的とする。具体的には日本側の持つデバイス加工技術とドイツ側の持つ結晶成長技術を組み合わせ、縦方向（成長方向）にトンネル伝導が起こる II-VI 族希薄磁性半導体ヘテロ構造 (MEB 結晶成長) を作成し、その構造を量子効果が現れる程度の微小サイズに加工し、さらにゲート電極を取り付けることによってトンネル過程を電氣的に制御する。このデバイスは、上下二つのスピンのうち的一方のみをゲート電圧操作によって選択的に透過させる 3 端子素子 (スピントランジスタ) として動作すると共に、量子情報処理や量子計算の実現に必要な「量子スピン伝導」の物理を理解するうえで理想的な系である。本共同研究で日独が交流を通じて相互的に取り組むことで、厳密な電子スピン偏極法や電子スピンの光制御、或いは光子-電子間の情報転写という量子情報技術の新しい方向性を見出すことが期待される。

2. 研究・交流の方法

1 年目:

プロジェクトの開始と同時に、日本側チームが GaAs 系量子ドットで実績があるメサライン付円柱構造を、本研究の量子ドットの基本構造として提案し、これの作製に取り組んだ。本研究ではゲート絶縁膜の開発が重要な鍵の一つとの認識から、日本側チームが有する電子線レジスト (カリックサレン) の II-VI 族磁性半導体共鳴トンネルダイオード構造に対するテストに着手した。さらに日本側チームは、新たに東北大学 新田教授の協力を仰ぎ、この円柱構造に ALD を用いて高品質絶縁膜を堆積するためのテストも開始した。平成 20 年度の後半から、こうして作製した試料の評価で行った。ドイツ側チームは量子井戸への Cd 添加による共鳴ピークの低電圧化など II-VI 族磁性半導体共鳴トンネルダイオード構造の基板の改良など結晶成長条件の最適化を行った。

平成 20 年 5 月 9 日にドイツ側研究チームの Molenkamp 教授と Gould 博士、Dengel 氏が来日し、東京大学本郷キャンパス内で日本側研究者とワークショップを開催した。まずこの国際交流研究で目指す、II-VI 族ベース磁性半導体を含む量子ドットの概要とこれまでの研究状況についてドイツ側から発表があった。続いて日本側から、人工原子と関連する研究について日本側チームから報告がなされた。さらに東北大 新田研究室の好田助教から ALD に関する解説と研究紹介が行なわれた。一連の講演の後、今後の研究方針と役割分担などの議論と打ち合わせを行った。

平成 20 年 8 月には日本側チームの大岩講師が、アムステルダムで開催された低温物理の国際会議で、関連研究の情報収集の後、Wurzbrug 大を訪問し、ドイツ側の研究環境を視察と、研究状況の打ち合わせを行なった。平成 21 年 1 月には、Molenkamp 教授が来日した際、樽茶教授、大岩講師と研究の進捗状況の確認と今後の打ち合わせを行なった。

2 年目:

平成 21 年度は II-VI 族半導体人工原子素子としてメサライン構造付量子ドット素子の作製を継続した。しかし平成 21 年度の後半に、II-VI 族半導体ではメサラインのリーク電流を抑えることができず、この方法では量子ドットの作製が難しいとの結論に至った。そこでドイツチームはドイツ側が従来用いてきた架橋型電極構造を再び採用し、柱状量子ドットの上に直接電極を取り付ける構造へ変更した。その後、ゲート絶縁体として窒化シリコンを用いた素子を試作し、低温でゲート電圧の効果のテスト測定を行った。これと並行して日本チームは、東北大新田研究室と共同して、II-VI 族半導体共鳴トンネルダイオード構造に対するアルミナ絶縁膜の特性評価に継続して取り組んできた。

平成 21 年 6 月 18・19 日に日本側チーム (樽茶教授、大岩講師、好田助教 (東北大 新田研)、博士課程学生 1 名) が Wurzburg 大学を訪問し、ワークショップを開催した。2 日目

は、プロジェクト研究に特化したセッションを開催した。ドイツ側からは、共鳴トンネル構造基板の成長とメサラインの作製と特性評価を含めた試料作製と評価に関する講演がなされ、日本側からは ALD 絶縁膜形成とその特性評価についての報告が行われた。その後、研究方針に関する議論と今後の方針について打ち合わせを行った。

3年目

ドイツチームは架橋型電極を有する II-VI 族半導体量子ドットの試作を行い、そのテスト測定を開始した。当面、ドイツ側のクリーンルームで使用可能である窒化シリコン絶縁膜をゲート絶縁膜として用いた試料を作成し、その動作をドイツチームと日本チームが共同して評価する。平行して、日独両チームが共同して、これまで日本チームが開発してきた ALD によるアルミナ絶縁膜形成を、ドイツチームが開発した架橋型電極量子ドット作製法と組み合わせることを検討し、試料を作製する。いずれの方法で、今年度中に量子ドットとしての動作とスピンフィルター効果を確認することを目指す。

10月14日、15日には、本共同研究から派生し、戦略的国際科学技術協力事業（共同研究型）日本（JST）ードイツ（DFG）共同研究「トポロジカルエレクトロニクス」主催のワークショップを開催し、その2日目の午後、インフォーマルディスカッションと言う形式で、において、本研究プロジェクトでの最近の結果の紹介と、議論を行った

3. 研究・交流実施体制

3. 1 日本側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー) 樽茶清悟	東京大学	教授	博士（工学）	日本側研究総括
(研究者) 大岩顕	東京大学	講師	博士（理学）	試料作製・素子設計
(研究者) 山本倫久	東京大学	助教	博士（理学）	低温精密測定
(研究者) 新田淳作	東北大学	教授	博士（工学）	ALD絶縁膜形成製
(研究者) 好田誠	東北大学	助教	博士（工学）	ALD絶縁膜形成
(研究者)				

3. 2 相手国側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー) L. Molenkamp	Würzburg大学	Prof. Dr.	PhD	ドイツ側研究総括
(研究者) C Gould	Würzburg大学	Dr.	PhD	輸送現象測定
(研究者) G. Schmidt	Würzburg大学	Priv. Doz. Dr.	PhD	素子設計
(研究者) K. Brunner	Würzburg大学	Prof. Dr.	PhD	MBE
(研究者) G. Dangel	Würzburg大学	PhD Student		試料作製、測定

4. 研究成果

4. 1 研究成果の自己評価

- 計画以上の成果がでた 計画通りの成果がでた
 計画とは異なるが有益な成果がでた 計画ほどの成果はでなかった
 いずれでもない

4. 2 研究成果の自己評価の根拠

研究による具体的な成果

1) II-VI 族磁性半導体縦型量子ドットの世界初の実現

半導体量子井戸基板を直径 1 μm 以下の柱上に加工して形成される縦型量子ドットで実績を持つ日本チームと、II-VI 族の成長と加工で世界有数の技術を誇るドイツチームとが 2 年かけ、議論と試行錯誤を繰り返し、II-VI 族磁性半導体にとって最適な加工方法を確立した。その結果、直径 1 μm 以下の II-VI 族磁性半導体縦型微小共鳴ダイオード構造の作製と共鳴トンネル効果の観測に成功した。さらに 3 年目に、ドイツチームが直径を 250nm まで小さくして、より電子を微小領域へ閉じ込めることにより、量子ドットに特徴的な伝導であるクーロン振動やクーロンダイヤモンドなどを観測することに成功し、II-VI 族磁性半導体量子ドット構造を世界で初めて実現した。特にクーロンピークの磁場依存性から、II-VI 族磁性半導体の特徴である電子と Mn の局在モーメントの間の強い交換相互作用を示唆する結果が観測されている。これはこれまでに報告されている量子ドットにはない、新たなスピン効果をもたらす量子ドットが当初計画通り実現できたことを示している。

2) ZnMnSe 量子井戸の共鳴ピークの低バイアス化に成功

研究開始直後、共鳴トンネルダイオード構造の共鳴ピークが高電圧側に表れるという問題があったが、Cd を ZnMnSe 量子井戸層に添加して、伝導帯のエネルギーを下げることで、III-V 族デバイスと比べても遜色ない低バイアス側へ大幅に共鳴ピークを移動させることに成功した。これはドイツグループの分子線エピタキシー成長による独自の成果である。

新しい知の創造/画期的な科学技術の進展/新分野の開拓

II-VI 族磁性半導体を用いたナノ構造と量子効果の実現と言う点で、新しいパラダイムを開いたと言える。これまで II-VI 族磁性半導体は大きなスピン効果が知られていて、スピントロニクス材料としての期待は高かったが、微細加工技術が確立しているとは言い難く、Si や GaAs 系半導体に比べると、狭い分野であった。しかし本研究成果は微細加工による II-VI 族半導体のスピントロニクス材料または量子情報分野への応用の可能性を示すに十分な成果で、今後、この II-VI 族磁性半導体量子構造という新しい分野の展開が期待できる。

相手国との協力による研究への相乗効果

本研究での量子ドットの実現は、ドイツチームの II-VI 族磁性半導体の成長・加工技術と、日本チームの GaAs 系量子ドットの作製技術と量子効果に関する知見とに基づいて、議論と試行錯誤を繰り返した成果である。日本チームは II-VI 族磁性半導体の加工や物性に関して、新たな知見を得ることができた。今後のより精密な測定では、日本チームが持つ低温精密測定技術がドイツチームにとって役立つことになると期待する。

当該研究の今後の展開見込、社会への波及効果

当初計画よりも 1-1.5 年ほど遅れたが、期間内に II-VI 族磁性半導体縦型量子ドットが実現できたため、当初、計画であったスピンフィルター効果の確認や、光子-電子スピン変換素子など今後の研究課題の展開に見通しは立っている。今後は、量子ドットの研究で実績がある日本チームがより多くの精密測定を行うことになる。また現在作製中の ALD で形成したゲート絶縁膜を有する量子ドット試料で、ゲート電圧による制御性を向上し、高性能量子ドットを開発する。現在得られつつある成果や、今後得られると期待される成果は、いずれも著名な論文で発表することが期待でき、新しい材料における量子スピン現象として、特にスピントロニクス分野

に興味を持って広く受け入れられると期待する。

4. 3 研究成果の補足

5. 交流成果

5. 1 交流成果の自己評価

- 計画以上の交流成果がでた 計画通りの交流成果がでた
- 計画ほどの交流が行われなかったが成果はでた
- 計画ほど交流成果がでなかった
- いずれでもない

5. 2 交流成果の自己評価の根拠

人的な交流

本研究を通じて、ワークショップを毎年、日本とドイツで交互に開催して、それぞれの研究チーム相手側研究チームを訪問し、交流を図ってきた。またその他に、日本チームからは東京大学 講師 大岩顕氏が、ドイツチームの研究環境の把握と研究打ち合わせに Wurzburg 大学を訪れた。ドイツチームからは代表者の Molenkamp 教授が二度、日本チームの研究室を訪れ、研究打ち合わせを行った。

相手国との研究交流につながる人材育成

日本チームのメンバーである東京大学講師 大岩顕氏は、研究期間にわたりドイツチームとの研究の窓口として、ドイツ側の担当者と打ち合わせを継続して行っており、個人的な研究者レベルのつながりが本研究を通じて形成できている。

当該事業を端緒とした相手国との研究交流の増加/持続的発展の可能性

本研究代表者を日本側チーム代表者とし、ドイツ側はやはり本研究のドイツチーム代表者 Molenkamp 教授を代表者として新たに、日本、ドイツ国内のトップレベルの研究者を加えて提案した「トポロジカルエレクトロニクス」が、JST 戦略的国際科学技術協力事業（共同研究型）日本（JST）ードイツ（DFG）共同研究に採択され、平成 21 年度から、より発展した形で、密な国際共同研究を継続している。

5. 3 交流成果の補足

6. 主な論文発表・特許出願

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
論文	A. Frey, M. R�uth, R.G. Dengel, C. Schumacher, C. Gould, G. Schmidt, K. Brunner, L.W. Molenkamp, J. Cryst. Growth 312 , 1036-1039 (2010)	