

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用
を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」
研究課題「電子フォトニクス融合によるポアンカレイ
ンターフェースの創製」

研究終了報告書

研究期間 2015年12月～2021年3月
(1年追加支援により、2022年3月まで延長)

研究代表者：大岩 顕
(国立大学法人大阪大学産業科学研
究所 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

偏光は光の普遍的な性質で様々な用途で利用されている。単一光子の偏光状態は主要な量子情報担体として活発に研究されている。今後、偏光の革新的利活用には、より高度で新しい技術の開発とその学術的な深化が必要である。そこで我々は、光を制御するフォトニックナノ構造と、高度な電氣的操作性と検出技術を有する量子ドット中のスピンの相互変換により新しい機能を創出する「ポアンカレインターフェース」を着想した。本プロジェクトでは光子偏光状態から電気制御量子ドット中の単一電子スピンへの量子状態転写に基づいたポアンカレインターフェースの創製に加え、その応用の一つとして、量子情報の長距離通信のための基盤技術開発に重点をおいて研究を行ってきた。光子—電子スピン量子状態転写研究で実績を持つ代表者を中心に、フォトニック結晶の世界的専門家である東大岩本グループと、半導体電子スピン量子ビットで世界をリードする理化学研究所中島グループ、そして半導体量子物性と量子情報処理の双方で優れた実績を持つ筑波大都倉グループでチームを構成した。

1. フォトニックナノ構造と電気制御量子ドットの融合による高効率・高品質ポアンカレインターフェースの創製

大岩グループと岩本グループが連携し、ダブルヘテロ型フォトニック結晶共振器に電気制御量子ドットを組み込んだ素子の設計から光学的・電氣的評価を行い、共鳴モードにおける吸収の増大と電気制御量子ドットの動作を実現した。フォトニック結晶共振器と電気制御量子ドットを組み合わせた世界初の成果である。表面プラズモンアンテナを使うことで量子ドットへの透過率が、理論値で20倍程度増大することを提案し、そして量子ドットを使った光生成単一電子検出実験から5～9倍程度の増大を実証した。さらに岩本グループは、当初計画になかった Bull's eye 共振器で600倍程度の吸収増大が可能であることを示した。これはポアンカレインターフェースの変換効率を数%以上まで向上できる可能性を示した重要な成果である。また、共振器による吸収増大を記述する解析式を導出し、共振器設計の指針を明らかにした。中島グループ(当時は樽茶グループ)と大岩グループは、基礎原理である光子偏光から電子スピンへの量子状態転写の原理実証を達成した。都倉グループは量子状態転写の忠実度に対する電子—正孔対の交換相互作用やフォノンの影響を解析し、高忠実度95%以上の変換が可能であることを明らかにした。

2. 長距離量子通信システムの基盤技術の開発

ポアンカレインターフェースを用いた量子中継システムの基盤技術として、光子対からスピン対への量子もつれ変換、ベル測定と中継システムの評価を行ってきた。樽茶グループ(H31年度から中島グループに合流)は、まず単一光子—電子もつれ対の生成の実験に着手した。パラメトリック下方変換によるもつれ光子対源を導入し、1つのもつれ光子対から光子と量子ドット中の電子の対を生成することに成功した。このとき光子—電子対生成レートとして0.2 Hzを得た。これは他の量子中継の候補とも遜色ない値である。しかしこの結果から推定される光子対から電子スピン対の生成率では実験的にスピン対の検出が困難であるため、電子スピン—光子偏光対の生成率の向上を重点的に行った。その結果、スピン対生成率を0.05 Hzまで改善し、今後、スピン対へのもつれ状態転写の実証実験が実現できる実験系を構築した。

中島グループは、パウリスピン閉塞と準安定な電荷状態を利用する独自の着想で、4つのベル基底の一つであるスピン—重項状態を高速かつ当初の目標を超える99%以上の高忠実度で検出する部分ベル測定を、GaAs量子ドットで早期に実現した。電気制御量子ドットは、すべてのベル基底を検出する完全ベル測定が実装できる利点がある。そこでSi量子ビットを使い完全ベル測定の評価を行い、測定時間400 μsで80%以上の忠実度で完全ベル測定が実施可能であるという重要な知見を得た。また同位体制御したSiGe/²⁸Si基板に形成した量子ドットにおいて最大3ミリ秒の量子メモリ時間を示し、こちらも早期に当初目標を超える数値を達成した。Si量子ドットのポアンカレインターフェース応用を検討する中で、通信波長帯との整合性や開発したベル測定やメモリ実装などで優位性を発揮できる候補として、新たにGe量子ドットを最適な材料系として選択し、最終年度に量子ドット動作を実現した。

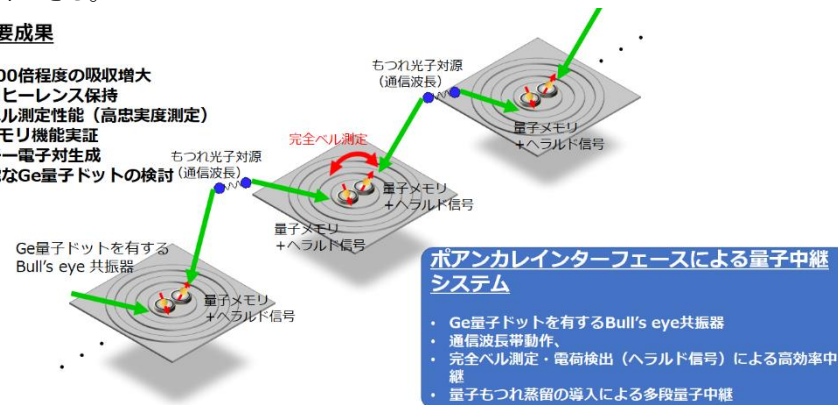
本プロジェクトで獲得した数々の知見や技術をもとに、ポアンカレインターフェースを使った量子

中継システムの検討を、都倉グループが中心となりすべてのチーム全体で連携して行ってきた。ポアンカレインターフェースの具体的なデザインとして、高変換効率、メモリ時間、通信波長帯での直接変換など優れた性能が期待できる Ge 量子ドットを含む Bull's eye 共振器を提案した。その Ge 量子ドットによる1段の量子中継の忠実度を評価し、もつれ変換の忠実度は 100 %に近く、将来、多段の量子中継の実現には不可欠な技術である量子もつれ蒸留が実装できる可能性を示した。量子もつれ蒸留は複数の量子メモリ状態を使った小規模の量子計算が必要であり、半導体量子ドットの持つ高いスケーラビリティでも優位性があることを明らかにした。また多段の量子中継では、完全ベル測定(成功確率 100 %)が実装できるポアンカレインターフェースは、光学的ベル測定(成功確率 25-50 %)を使う原子アンサンブル系、ダイヤモンド NV 光中心に比べ、量子中継の効率の点で優位であることも示した。

以上のように、本プロジェクトでは、光子-電子スピン量子状態転写、光子対からスピン対への量子もつれ転写の評価、メモリ性能や完全ベル測定など重要な学術的成果を達成してきた。その知見と技術に基づき、ポアンカレインターフェースの具体的な形として Ge 量子ドットを含む Bull's eye 共振器を提案し、多段量子中継技術でのポアンカレインターフェースの優位性を明らかにした。ポアンカレインターフェースは世界的にも独自性の高い研究であるため、今後、提案した量子中継システムの研究開発を継続して推進することは量子情報処理と量子暗号通信の分野で重要な貢献をすることが期待できる。

本プロジェクトの主要成果

- Bull's eye共振器：600倍程度の吸収増大
- 量子状態転写実証：コヒーレンス保持
- Si量子ドット：完全ベル測定性能（高忠実度測定）
量子メモリ機能実証
- もつれ光子対から光子-電子対生成
- 通信波長帯で転写可能なGe量子ドットの検討



ポアンカレインターフェースによる量子中継システム

- Ge量子ドットを有するBull's eye共振器
- 通信波長帯動作、
- 完全ベル測定・電荷検出（ハラルド信号）による高効率中継
- 量子もつれ蒸留の導入による多段量子中継

図 1-1 本プロジェクトの主要成果とポアンカレインターフェースによる量子中継システムの概念図

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 光の偏光状態から電子のスピン状態への量子状態転写

概要：ポアンカレインターフェースの核となる物理である光の偏光状態から電子のスピン状態への角運動量転写を実証し、さらに重ね合わせを変換する量子状態転写の原理を実証した。本研究により、光生成単一電子スピンを計測する方法が確立され、光子からゲート制御によって形成した量子ドットの電子スピント量子状態を転写可能であることが初めて示された。これにより、今後、電気制御量子ドットを用いた量子状態転写および情報処理技術の発展が期待される。【成果シート(6-1)①-24、(6-1)①-25】

2. Si 量子メモリの性能評価

概要：量子中継点における量子メモリとしての活用が期待される Si 量子ドットにおいて、電子スピンの 3 ミリ秒を超えるメモリ時間を有し、かつ 99.9%以上の高精度で制御可能であることを実証した。これにより、中継点で量子情報を長時間保持しながら、量子中継に必要なとされる高精度なベル測定や量子演算が実装可能であることが示され、様々な量子情報処理技術への応用が期待される。【成果シート(6-1)①-8、(6-1)①-14、(6-1)①-20】

3. 量子状態転写におけるコヒーレンス保持の解明

概要：光子の偏光状態から電子スピンへの量子状態転写において、コヒーレンスがどれくらい

保持されるかについての定量的な知見を得た。本プロジェクトが対象とする構造では従来とは異なり正孔が閉じ込められないため高い量子状態転写の忠実度が期待できることを明らかにした。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. フォトニックナノ構造と電気制御量子ドットの融合と変換効率増大

概要： フォトニックナノ構造中に電気制御量子ドットを組み込むことを達成し、フォトニックナノ構造の光(光子)を制御する機能と、電気制御量子ドットの持つ電荷やスピンの高度な電気制御性を融合する新しいフォトニックナノ量子デバイスを実現した。これは世界初の成果である。その機能の一例としてポアンカレインターフェースとしての応用展開で重要な光子からスピンへの量子状態の変換効率は 600 倍程度の増大が可能であることを明らかにした。

【成果シート(6-1)①-2、(6-1)①-26】

2. もつれ光子対と電気制御型量子ドット中の光電子の同時検出

概要： 量子中継の実現に必要なもつれ光子対の生成と、その片方の光子から電気制御量子ドットへの光電子の生成技術を開発した。さらに、光子対から生成された一方の光子の検出と、もう一方の光子による量子ドット中の光電子生成を同時に検出するシステムを確立した。本成果により、ポアンカレインターフェースを用いた量子中継器に必要な基盤技術が確立された。

【成果シート(6-1)①-9】

3. ポアンカレインターフェースを利用した量子中継システムの評価と提案

概要： 本プロジェクトで開発を推進したポアンカレインターフェースを使った量子中継システムの性能評価と提案を行った。ポアンカレインターフェースとして、量子中継で優れた性能を有する Ge 量子ドットを含む Bull's eye 共振器で構成される高性能 1 段量子中継システムを提案した。将来的には量子もつれ蒸留機能を組み合わせることにより、多段の量子中継システムへも拡張できることを提案した。これは量子中継の他の物理系に優位性を持つので、開発を進めれば量子中継の主要技術になり、量子ネットワークの構築に貢献する提案である。

< 代表的な論文 >

1. Fabrication and optical characterization of photonic crystal nanocavities with electrodes for gate-defined quantum dots”, T. Tajiri, Y. Sakai, K. Kuruma, S. M. Ji, H. Kiyama, A. Oiwa, J. Ritzmann, A. Ludwig, A. D. Wieck, Y. Ota, Y. Arakawa, and S. Iwamoto, *Jpn. J. Appl. Phys.***59**, SG, SGGI05 (2020).

概要： 電気制御量子ドットのゲート電極を含むダブルヘテロ型フォトニック結晶共振器を作製し、ゲート電極の有無によらず共振器モードが観測されたことと、偏光依存性を議論した。さらにフォトルミネッセンス励起スペクトルで、共振器モードにおいて吸収を確認した。電気制御量子ドットを含むフォトニック結晶共振器を報告した世界初めての論文である。

2. Photogeneration of a single electron from a single Zeeman-resolved light-hole exciton with preserved angular momentum”, K. Kuroyama, M. Larsson, C. Y. Chang, J. Muramoto, K. Heya, T. Fujita, G. Allison, S. R. Valentin, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Matsuo, A. Oiwa, and S. Tarucha, *Physical Review B* **99**, 085203-1 – 085203-5 (2019).

概要： ポアンカレインターフェースの核となる物理である光の偏光状態から電子のスピン状態への量子状態転写を光学スピン閉塞効果および単一スピン読み出しを用いて原理実証した。本研究により、光子からゲート制御によって形成した量子ドットの電子スピンへと量子状態を転写可能であることが初めて示された。これにより、今後、電気制御量子ドットを用いた量子状態転写および情報処理技術の発展が期待される。

3. ”Robust Single-Shot Spin Measurement with 99.5% Fidelity in a Quantum Dot Array”, T. Nakajima, M. R. Delbecq, T. Otsuka, P. Stano, S. Amaha, J. Yoneda, A. Noiri, K. Kawasaki, K. Takeda, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, D. Loss, and S. Tarucha, *Physical Review Letters* **119** 017701 (2017)

概要： 量子メモリとしての活用が期待されている半導体量子ドットデバイス中の 2 電子スピンの

状態に対して、量子中継に必要とされる最大量子もつれ基底(ベル基底)への射影測定を高精度化した。従来のスピン閉塞現象を利用した方法では、短いスピン緩和時間のために精度の向上が困難であったが、本研究では新たに余剰電子を用いた準安定状態を利用することで長い緩和時間と電気信号の増強を同時に達成し、ベル測定の忠実度 99.5%を実現した。この結果は量子中継の効率を改善するだけでなく、量子計算に必要となる精確な量子ビット読み出しにも大きな寄与をもたらした。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 大岩グループ

研究代表者:大岩 顕(大阪大学産業科学研究所 教授)

研究題目:ポアンカレインターフェースの創製

- ・電気制御量子ドットを導入可能なフォトニックナノ構造の設計と作製・評価(研究計画項目1-1)
- ・フォトニックナノ構造を用いたポアンカレインターフェース基盤技術開発(研究計画項目1-2)
- ・Si量子ドットでのポアンカレインターフェースへの実装と評価(研究計画項目2-2)
- ・光-スピン流変換とポアンカレ偏光検出器の開発(研究計画項目3-1)

② 岩本グループ

主たる共同研究者:岩本 敏(東京大学生産技術研究所 教授)

研究題目:ポアンカレインターフェースのためのフォトニックナノ構造技術の開発

- ・電気制御量子ドットを導入可能なフォトニックナノ構造の設計と作製・評価(研究計画項目1-1)
- ・フォトニックナノ構造を用いたポアンカレインターフェース基盤技術開発(研究計画項目1-2)

③ 中島グループ

主たる共同研究者:中島 峻(理化学研究所創発物性科学研究センター 上級研究員)

研究題目:光スピンもつれ変換ならびにSi量子ドットポアンカレインターフェースによる量子中継技術開発

- ・単一光子もつれ対の生成と電子スピンと光子の間の角運動量相関(研究計画項目2-1-1)
- ・ベル測定の高忠実度化(研究計画項目2-1-2)
- ・光子ベル基底の生成とスピン対ベル基底への変換(研究計画項目2-1-3)
- ・Si量子ドットでのポアンカレインターフェースへの実装と評価(研究実施項目2-2)

④ 都倉グループ

主たる共同研究者:都倉 康弘(筑波大学数理物質系 教授)

研究題目:光子-電子スピン量子変換理論

- ・光子-電子スピン量子変換におけるコヒーレンスの検討(研究計画項目1-3)
- ・ベル測定の高忠実度化の検討(研究計画項目2-1-2)
- ・長距離量子情報通信のための量子中継システムの検討(研究計画項目2-3)

補足

研究開始当初は、大岩グループ、岩本グループ、都倉グループの他、樽茶グループ(東京大学)、大塚グループ(理研)で開始した。H30年2月に大塚の東北大学電気通信研究所准教授への昇任により、グループリーダーを中島に変更。樽茶グループは、樽茶教授の東京大学退職と理化学研究所への異動により、H31年4月に中島グループへ合流した。

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

● ルール大学ボーフム Andreas Wieck 教授

光子から電子スピンへの量子状態転写を可能にする条件を満たす高品質 GaAs 量子井戸基板を、共同研究としてドイツのルール大学ボーフムの Andreas Wieck 教授から、本プロジェクトへ提供を受けている。H29年9月に大岩がルール大学を訪問し、Wieck 教授や研究員と大学院生らと、これまでの研究状況と今後の方針について、打ち合わせを行った。

研究期間、非常に密な共同研究を行っている。ただし R1 年 7 月ごろに先方の半導体製造装置(分子線エピタキシー装置)が故障し、その後調整を続けてきたが、当初予定よりも大幅に時間がかかり、フォトニック結晶用基板などの提供が遅れ、本研究の進捗に影響を与えることとなってしまった。

- デルフト工科大学 Vandersypen 教授、Scapoucci 博士
H29 年 8 月に、電子スピン量子コンピュータの開発で世界的研究拠点の一つであるデルフト工科大学 QuTech の Vandersypen 研から藤田博士が、阪大産研の大岩グループに助教として着任し、CREST 研究に参画した。さらに、共同研究へ発展させるため、領域の若手研究者の欧州研究機関派遣を利用して、大岩グループの木山助教を Vandersypen 研へ1年間派遣した。また同じ QuTech の Scapoucci 博士より Ge/GeSi 量子井戸構造を提供いただき、Ge 量子ドットを使ったポアンカレインターフェース開発で共同研究を R1 年 3 月から開始した。このように CREST 研究を通じてデルフト工科大 QuTech と強固なネットワークを構築できた。
- 京都大学化学研究所 金光教授
大岩グループが作製した表面プラズモンアンテナの反射特性の測定を行った。さらに Ge 量子井戸のポアンカレインターフェース応用の検討のため、Ge における光学的スピン偏極を検出するべく赤外領域での逆スピンホール効果測定を準備中である。
- カナダ国立研究機構(NRC) Austing 博士
代表者やグループのメンバーとも旧知の間柄である Austing 博士のグループも、ちょうど CREST 研究が始まったころからポアンカレインターフェースの研究を開始した。NRC で彼らは、希釈冷凍機中に光ファイバーで光子を導入し、低温ではピエゾステージを使って試料との位置合わせを行うという、我々の室温部から光学窓で照射するというシステムとは異なる方式を使っており、相補的に共同研究を行うことができる。R1 年度に、本プロジェクトの支援もいただき、博士後期課程と博士前期課程の学生、それぞれ 1 名を 3 か月間、NRC へ派遣し、共同研究を行った。また R1 年度には大阪大学の国際共同研究促進プログラムに採択され、国際ジョイントラボとして R3 年までの 3 年間の支援を受けた。また NRC との共同研究を促進する Challenge Program IoT Quantum Sensing Program に採択され、ポアンカレインターフェースに関する Austing 博士との共同研究を、3 年間支援を受けている。