

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中盤技術
平成 27 年度採択研究代表者

2018 年度 実績報告書

大岩 顕

大阪大学産業科学研究所
教授

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

§ 1. 研究成果の概要

本プロジェクトでは、フォトニックナノ構造と電界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とそのポアンカレインターフェースを用いた長距離量子通信システムの基盤技術の開発を目指している。ポアンカレインターフェースの創製ではフォトニック結晶ナノ共振器と電界制御量子ドットの融合で大きな進展があり、電界制御量子ドットを形成可能な電極構造を有するフォトニック結晶ナノ共振器(図(a))を試作し、顕微発光測定により量子井戸発光波長付近に共鳴波長を有する共振器モードの観測に成功した(図(b))。さらにエアブリッジ構造にしている試作試料ではあるが、電気伝導測定により、フォトニック結晶ナノ共振器構造中に世界で初めて電界制御量子ドットが形成できることを確かめた。また、円偏光の受光に向け、円形ブラッグ反射鏡構造を利用した新たな共振器構造を考案し、2次元電磁界解析で円偏光光子の吸収に不可欠な縮退双極子モードを実現できる可能性を明らかにした。また継続している表面プラズモンアンテナによる光子-電子変換増強について、より現実に近い、ガウシアンビームに対する表面プラズモンアンテナを新たに設計し、電磁界解析から、量子状態変換が起こる波長で透過率が約 8 倍増幅できることを明らかにした。また本研究の基本原理となる光子から電子スピンへの角運動量と重ね合わせ状態の転写の成果が、今年度それぞれ論文として採択決定あるいは発表された。

ポアンカレインターフェースでの量子状態変換のコヒーレンスについて、近接した二重量子ドットにおける光子-電子スピン変換の忠実度の検討を開始した。また、生成電子スピンのコヒーレンス保持を目指し振動外場による電子系の制御に関する理論的検討を加え、トンネル結合の時間的制御が有効であることを見出した。

長距離量子通信システムの基盤技術として、GaAs 系ポアンカレインターフェースを使ったもつれ相関変換実現のため、今年度はもつれ光子対源など光学系の改良を行った。もつれ光子対の発生率を 15 kHz から 40 kHz に大幅に改善するとともに、光電子生成効率も向上することに成功し、今後の光子ベル基底の生成とスピン対ベル基底への変換の実験に必要な条件を満たす実験系の構築を完了した。

長距離量子通信システムの基盤となる量子中継では、光子からの情報を転写された2つの電子スピンに対しベル測定を行う必要がある。その高忠実度化に関連して、ベル測定に必要なスピン測定における測定の反作用と量子フィードバックの可能性について、確率量子マスター方程式を用いた理論解析を進めた。一方で、量子中継器に必要とされる長いメモリ時間を有する Si 量子ドット素子の開発を進めた。本年度はこのベル測定のための2スピン個別読み出しを実証した。今後は2スピン間の制御 NOT ゲート操作と組み合わせることで、ベル測定の実装を目指す。さらに Si 量子ドットをポアンカレインターフェースへ応用に向け、Si 基板において逆スピンホール効果による光励起電子スピンの検出にも成功した。

本プロジェクトの最終目標の一つである、長距離量子通信システムの提案にも着手し、量子ドット中の電子スピンを量子メモリとする量子中継システムと、メモリを持たないシステムの性能比較を理想的な状況で行い、量子メモリの有効性を確認した。

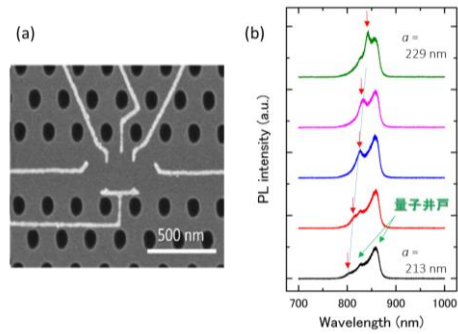


図 電界制御量子ドットを含むダブルヘテロ型フォトニックナノ共振器の電子顕微鏡写真(a)と室温における顕微発光スペクトル(b)

【代表的な原著論文】

1. K. Takeda et al., “Optimized electrical control of a Si/SiGe spin qubit in the presence of an induced frequency shift”, npj Quantum Information, vol. 4, pp.54, 2018.
2. K. Kuroyama et al., “Photogeneration of a single electron from a single Zeeman-resolved light-hole exciton with preserved angular momentum”, Phys. Rev. B **99**, 85203 (2019)
3. T. Fujita et al., “Angular momentum transfer from a single-photon polarization to an electron spin in a gate defined quantum dot”, Nature communications (accepted)

§ 2. 研究実施体制

(1) 大岩グループ

① 研究代表者:大岩 颯 (大阪大学産業科学研究所 教授)

② 研究項目

大岩グループは代表者の研究グループとして、各研究グループと連携しながら、研究目的であるポアンカレインターフェースの創製を達成できるよう全体を総括する。

- ・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
- ・フォトニックナノ構造と融合した量子ドットにおける高効率光-電子変換の実証
- ・Si 2次元電子系における円偏光-スピン流変換とスピン選択励起の評価
- ・長距離量子情報通信のための量子中継システムの検討
- ・円偏光-スピン流変換とポアンカレ偏光検出器の開発

(2) 樽茶グループ

① 主たる共同研究者:樽茶 清悟 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

② 研究項目

- ・単一光子もつれ対の生成、片方の光子で生成したスピンと他方の光子の相関
- ・光子ベル部分基底の生成とスピン対への角運動量転写
- ・光子対ベル基底の生成、スピン対ベル基底への転写

(3) 岩本グループ

① 主たる共同研究者:岩本 敏 (東京大学生産技術研究所 准教授)

② 研究項目

- ・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
- ・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

(4) 中島グループ

① 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 研究員)

② 研究項目

- ・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
- ・ベル測定の高忠実度化

(5) 都倉グループ

① 主たる共同研究者:都倉 康弘 (筑波大学数理物質系 教授)

② 研究項目

- ・光子-電子スピン量子変換におけるコヒーレンスの検討
- ・ベル測定の高忠実度化の検討

- ・長距離量子情報通信のための量子中継システムの検討