

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
2015年度採択年度]年度採択研究代表者

2019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

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プラズモンアンテナに加え、円形ブラッグ反射鏡共振器を新たに導入し、吸収増大による変換効率の向上の実証段階に入っている。ゲート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の励起発光スペクトルの測定において、共振器モード波長近傍で発光強度の増大を観測した(図(a))。これは同構造において共振器モードに起因する吸収増強が生じていることを示す結果である。フォトニック結晶ナノ共振器中の量子ドット形成にも成功したが、電荷ノイズによる不安定性などポアンカレインターフェースとしての問題も明らかになったため、半導体量子井戸構造の最適化とそれに合わせたフォトニック結晶ナノ共振器の設計を行った。また、円形ブラッグ反射鏡を用いた共振器構造において、円偏光受光に必要な条件である 2 つの直交する直線偏光の入射に対して同じ吸収増強度が得られること、さらに 2 次のブラッグ反射鏡を用いることで、共鳴波長において 300 倍近い吸収増大が得られることを数値計算により示した(図(b))。プラズモンアンテナでは、実験状況を反映したより現実的な数値計算に基づいて設計・作製したプラズモンアンテナ素子の透過スペクトルを光伝導により測定し、理論計算とよく一致することともに10倍程度の透過率増大を確認した。

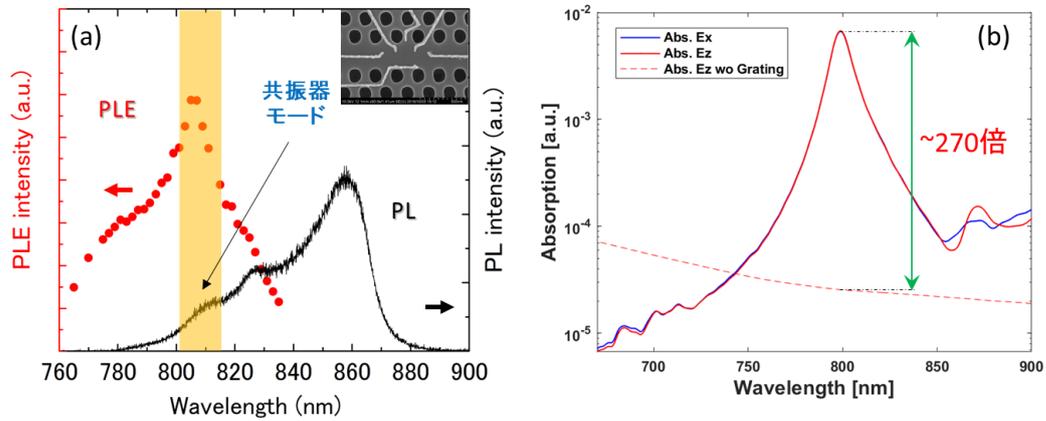
量子状態変換におけるコヒーレンスの保持に関して、近接した二重量子ドットにおける光子-電子スピン変換の忠実度に対するフォノン散乱の効果、および電荷測定の効果を検討した。また、生成電子スピンのコヒーレンスに影響を与える、スピン・軌道相互作用の大きさを振動電場で検出する精度を調べた。特に振動電場振幅の大きい場合には暗状態が関与する可能性があることを明らかにした。その他、単一量子間コヒーレント変換の基盤技術として単一光生成スピン検出と単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写に関する成果を論文として発表した。

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の実験系を理化学研究所に構築した。もつれ光子対の同時検出(検出レート:4-10 kHz)を確認し、もつれ光子対の同時照射に応用可能な実験系とすることで、光子対ベル基底のスピン対ベル基底への変換実験に必要な準備を整えた。

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。本年度は量子中継器に必要とされる長いメモリ時間を有する Si 量子ドット素子において、4 つのベル状態を全て識別する完全ベル測定の実装に取り組んだ。そのための技術要素として、電子スピンの高速単発測定および制御 NOT ゲート操作を実証し、高忠実度ベル測定実装への道筋を示した。ベル測定に付随し必要な、少数の補助ビットを用いた量子エラー訂正の有効性を調べた。また任意の CPTP 写像での不可逆な操作について定量的な評価を進めた。

このように量子中継に必要な量子ゲート操作の開発で進展がある IV 族量子ドットのポアンカレインターフェースへの応用に向け、通信波長帯と整合する可能性のある Ge 量子ドットに着手した。本年度、量子ドット作製の基本技術の確立と 2 次元正孔量子井戸の評価に取り組み、Ge 2 次元正孔系におけるスピン選択励起の検証実験を金光グループと共同研究で進めている。

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の検討を進め、現実的な成功率、忠実度をパラメータとして性能比較を開始した。



【代表的な原著論文】

1. T. Fujita, K. Morimoto, H. Kiyama, G. Allison, M. Larsson, A. Ludwig, S. R. Valentin, A. D. Wieck, A. Oiwa and S. Tarucha, "Angular momentum transfer from photon polarization to an electron spin in a gate-defined quantum dot", Nature Communications, vol. 10, 2991 1–6, 2019.
2. T. Nakajima, A. Noiri, K. Kawasaki, J. Yoneda, P. Stano, S. Amaha, T. Otsuka, K. Takeda, M. R. Delbecq, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, D. Loss, S. Tarucha, "Coherence of a Driven Electron Spin Qubit Actively Decoupled from Quasistatic Noise", Phys. Rev. X vol. 10, p.011060, 2020.
3. 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, "Fabrication and optical characterization of photonic crystal nanocavities with electrodes for gate-defined quantum dots", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 59, SG, SGGI05 (2020)

§ 2. 研究実施体制

(1) 大岩グループ

① 研究代表者:大岩 顕 (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
(研究計画項目1-1)
- ・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
(研究計画項目1-2)
- ・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
(研究計画項目2-2-2)
- ・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)
- ・円偏光-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

① 主たる共同研究者:岩本 敏 (東京大学生産技術研究所 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
(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

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

- ・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
(研究計画項目2-1-1)
- ・光子対ベル基底の生成、スピン対ベル基底への転写(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(研究計画項目2-2)
- ・ベル測定の高忠実度化(研究計画項目2-1-2)

(4) 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(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)