

スピン量子ビットの光量子ネットワーク化

大阪大学 産業科学研究所 大岩 顕

1. はじめに

近年、量子情報技術が次世代の新しい情報処理として活発に研究されている。超伝導量子ビットでは、1000 ビットを超える量子コンピュータの登場も間近に迫るなど進展が著しい。将来の誤り耐性汎用型量子コンピュータの実現は、100 万量子ビットを超える大規模な量子状態制御という量子科学の挑戦だけでなく、希釈冷凍機の高性能化や低温 CMOS 技術など低温技術の挑戦でもある。

半導体スピン量子ビットは、固体の量子状態としては比較的長いスピンコヒーレンス時間を持ち、高い電気制御性や半導体集積回路技術との高い整合性など優れた特長を持つ量子ビットである。また半導体であることは光物性や光デバイスとしての特長も有する。実際に量子光源などの研究も数多くなされている。スピン量子ビットとして現在主流の微細ゲート電極で電子（正孔）を閉じ込めるゲート制御量子ドットと長距離量子情報担体である光子との間で量子状態変換が可能になれば、光量子ネットワークへの半導体量子コンピュータの接続や、長距離量子情報通信など、その可能性は大きく広がる。本稿では半導体スピン量子ビットを光量子ネットワーク化するための研究として半導体量子ドットの低温輸送測定とフォトニックナノ構造を融合させた研究について紹介する。

2. 光子偏光—スピン量子状態変換

光子による量子ネットワークへスピン量子ビットを接続するためには、光子から電子（正孔）のスピンへ量子状態をコヒーレントに変換する必要がある。Vrijen らにより、GaAs などの直接遷移型半導体における角運動量保存光学選択則に基づき、光の進行方向と直交する方向に印加された磁場下での軽い正孔スピンを利用した、電子スピン状態と偏光状態での量子状態変換が提案された¹⁾。この提案を基に、筆者らのグループは、GaAs 系ゲート制御量子ドットを中心に研究を推進し、単一光子偏光状態から単一スピン状態への量子状態変換を実証した^{2,3)}。

ゲート制御量子ドットでは、近傍に作りこんだ電荷計を使い、量子ドット中の単一電荷を検出することができる。室温窓を備えた希釈冷凍機の低温部に置かれた量子ドットへ微弱光を照射する。量子ドットに単一光子偏光が吸収され、単一電子

スピンの生成される。二重量子ドットの二電子状態でのパウリ排他律とドット間遷移を利用することで、スピン情報が電荷情報に変換され、単一偏光光子が生成した単一スピンを検出することができる³⁾。

3. 光子—スピン変換効率の向上

このように単一光子偏光から単一電子スピンへ量子状態変換の原理実証により、スピン量子ビットが量子通信や光量子ネットワークでの量子インターフェースとしての可能性が示された。しかし照射した単一光子が量子ドット中の単一電子へ変換される効率は 10^{-5} - 10^{-4} と低く、高度な光子—スピン変換の実験や量子通信などへの応用の障壁となっている。変換効率を決める要因は大きく2つある。一つは希釈冷凍機内の低温中で集光された光の径（数 μm ）と量子ドットの大きさ（ $<1\mu\text{m}$ ）の不整合で、もう一つは単一量子井戸の低い吸収である。我々はフォトニックナノ構造を使うことで変換効率を向上することを試みている。

表面プラズモンアンテナは、中心に開口を持つ金属の同心円状の凹凸がついた構造で、絶縁体を挟んでゲート制御量子ドット直上に取り付けられている⁴⁾。垂直に入射された光が横方向に伝搬する表面プラズモンモードへ変換され、開口へ伝搬されることで量子ドットへ効率的に光照射できると期待される。単一光子から単一電荷への変換実験を行ったところ、軽い正孔遷移に合わせて設計した共鳴波長で、5~10 倍程度変換効率が向上することが分かった⁵⁾。一方でプラズモンは金属中の電子の集団振動であり、コヒーレンスやもつれ相関の保持は物理的にも興味深い問題である。

ブルズアイ共振器は同心円状に量子井戸基板をエッチングし、下部の犠牲層も取り除くことで中空構造にした回折格子型共振器構造である。量子状態変換の動作波長と共振波長を合わせることで実効的に変換効率を増大させることができる。シミュレーションでは2次回折条件を利用することで、およそ400倍の吸収増大が可能であることを明らかにした⁶⁾。さらに実際にブルズアイ光学共振器を作製し、共振モードを観測し、その共振モードでの吸収が偏光方向にほとんど依存せず量子状態を正確に転写できる条件を満たしていることを実証した⁷⁾。現在は量子ドットを形成し、単一

光子検出実験により、期待される高い吸収増大、つまり変換効率増大の実証を目指している。

4. スピン量子ビットによる量子中継へ

将来、量子情報通信は既存の光ファイバー網を用いて行われ、通信距離の延伸に量子中継技術が必要となる⁸⁾。我々はこの光子-スピン量子インターフェースは量子中継に有望であると期待している^{9,10)}。量子中継では、遠隔2地点に量子もつれを配信し、各中継地点でベル測定を行うことで量子もつれ相関をより遠隔間に生成する⁸⁾。このためには各中継地点で量子状態を保持しておくメモリとその変換効率、中継地点での正確なベル測定、加えて通信波長帯で動作することなど様々な要件が必要である。ダイヤモンドや冷却原子など研究が進んでいるものの、まだ確定した物理系はない。半導体スピン量子ビットは、比較的長いコヒーレンス時間 (Si 量子ビットで数 ms) を持つため中継地点で量子メモリとして動作し¹¹⁾、さらにバンドギャップを調整することで通信波長帯とも整合するなど、多くの利点を持つ。上述のブルズアイ共振器を使えば数%程度まで変換効率の向上が可能になると期待される。ここで、2地点で量子もつれを配信する1段量子中継を考えると、片側の量子ドットで光子を受け取ってから、もう片方の量子ドットが別の光子を受け取るまでの間、スピンコヒーレンスが保持されている必要がある。パラメトリック下方変換ではもつれ光子対が100kHzほどで生成できると仮定すると、2地点でスピン対が形成される平均時間は0.1~1msとなり、スピンコヒーレンス時間と同程度であるため1段量子中継は可能である。そこで、光子対から遠隔スピン対へのもつれ変換を実験的に実証することが次の段階の目標である。

5. まとめ

本稿では光子偏光-スピン量子状態変換に基づき、量子コンピュータの有力な候補であり、集積性の高いゲート制御量子ドットを使った量子インターフェースとその量子中継応用を紹介した。単一光子偏光から単一電子スピンへ量子状態変換が可能であること、表面プラズモンアンテナやブルズアイ光共振器による変換効率向上の成果は、量子中継器のための物理系として有望であることを示唆する。材料の点では、通信波長帯動作と量子メモリの観点で Ge 量子ドットに注目し、その実

証実験を試みている。またこの量子インターフェース技術は、半導体量子コンピュータを光量子ネットワークへ接続するトランスデューサへも展開できる。このように半導体低温量子輸送とナノフォトニクスを融合させた新しい低温実験が、量子技術に新しい分野を拓くと期待している。

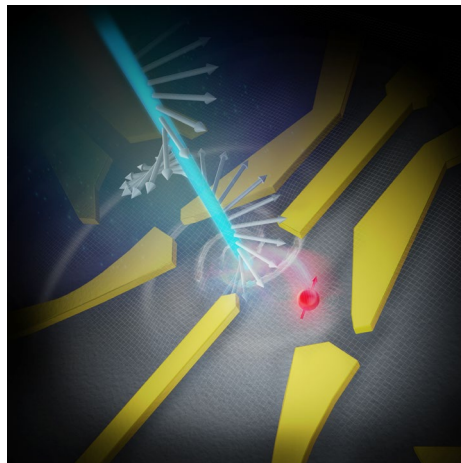


図1 ゲート制御量子ドットによる光子-スピン量子インターフェースのイメージ図。

6. 参考文献

- 1) R. Vriegen and E. Yablonovitch Phys. E **10** (2001) 569.
- 2) T. Fujita et al., Nat. commun. **19** (2019) 2991.
- 3) K. Kuroyama et al., Phys. Rev. B **99** (2019) 085203.
- 4) R. Fukai et al., Jpn. J. Appl. Phys. **56** (2017) 04CK04.
- 5) R. Fukai et al., Appl. Phys Express **14** (2021) 125001.
- 6) S. Ji et al., Jpn. J. Appl. Phys. **60** (2021) 102003.
- 7) S. Ji et al., Jpn. J. Appl. Phys. **62** (2023) SC1018.
- 8) H. J. Briegel et al., Phys. Rev. Lett. **81** (1997) 5932.
- 9) L. Gaudreau et al., Semicond. Sci. Tech. **32** (2017) 093001.
- 10) A. Oiwa et al., J. Phys. Soc. Jpn **86** (2017) 011008.
- 11) J. Yoneda et al., Nature nanotech. **13** (2018) 102.

7. 謝辞

本研究はムーンショット目標 6(JPMJMS2066-31、JPMJMS226B)と科研費基盤研究(S)(23H05458)、JST CREST (JPMJCR15N2)、QSP013 の支援を受けて行われました。