


光子—スピン量子状態変換に基づく半導体スピン量子ビットの革新的量子中継技術の創製

	研究代表者	大阪大学・産業科学研究所・教授 大岩 顕 (おおいわ あきら)	研究者番号:10321902
	研究課題情報	課題番号: 23H05458 キーワード: 光子—スピン量子インターフェース、量子ドット、スピン量子ビット、量子中継	研究期間: 2023年度~2027年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

近年、量子力学の原理に基づく量子コンピュータや量子暗号通信など、私たちの社会に革新的な変化をもたらすと期待されている量子情報技術の研究が、世界的情報会社や世界中の大学や研究機関などで非常に活発に推進されている。将来、この量子情報を日常的に私たちが扱えるようになるためには、現在のインターネットのように、量子情報を世界規模でやり取りする量子ネットワークが不可欠である。その根幹技術の一つが長距離化で、ダイヤモンドNV中心や冷却原子などの量子情報の担体（量子ビット）を舞台にして研究開発が進んでいる。しかしそれぞれの物理系で固有の課題があり、量子中継を実現する決定的な物理系はまだない。

半導体微小構造にたった一つの電子や正孔を閉じ込め、その電子や正孔が持つ磁石の性質（スピン）を使った半導体スピン量子ビットは半導体集積回路プロセスとの親和性の高さから、将来の量子コンピュータの有力候補として研究が進んでいる。一方で、半導体の重要な特徴は光デバイスの機能である。私たちは半導体スピン量子ビットは量子通信にも有望であると考え、量子ネットワークでの喫緊の課題である長距離化に必要な量子中継へ半導体スピン量子ビットを応用すべく、光の量子情報の単位である光子との間で量子情報を変換する技術の研究を推進している。

本研究では、量子中継の実現を光子偏光からスピンへの量子状態変換の技術を格段に向上させるための原理・方法を確立して、革新的な性能を実現することで、半導体スピン量子ビットを量子中継の有力な候補に押し上げ、その実現に貢献することを目指す。具体的には、通信波長帯で直接動作するゲルマニウム量子ドットを中心とし、フォトニック共振器との融合による高効率変換や量子情報のメモリ機能などの高性能化を図るとともに、新しく量子中継のための量子光源もスピン量子ビットで開発することに挑戦する。

量子ネットワークがもたらす量子情報社会へ

スピン量子ビットを用いた量子中継器による長距離量子情報通信の基盤技術

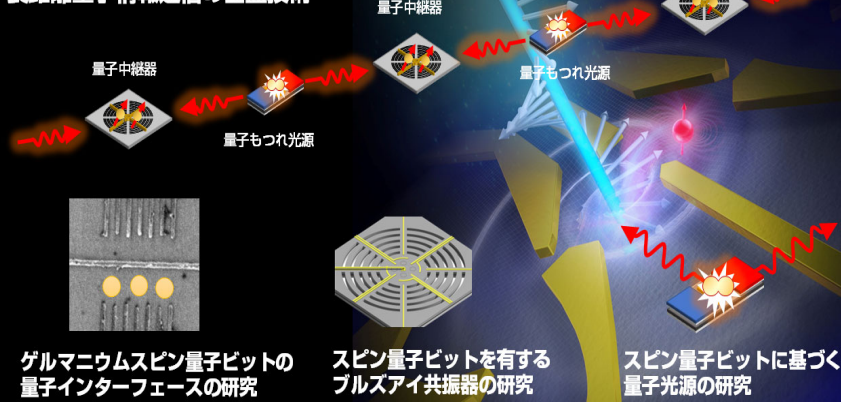


図1 スピン量子ビットに基づく量子中継と本研究のイメージ図

図1に示すように我々が提案する量子中継方式は、量子もつれ光子対源から生成されたもつれ光子を中継地点へ配信し、光子偏光状態からスピンへ変換し、量子情報を保持しつつベル測定と呼ばれる量子計算を高精度に行うことで量子情報の通信距離を延ばすことが可能になる。そこで本研究ではこの光子—スピン量子状態変換とベル測定を行う量子インターフェースと量子もつれ光源をスピン量子ビットで実現するという世界的でも独自性の高い研究を推進する。これまで我々がGaAsスピン量子ビットで展開してきた量子インターフェースの研究の知見に基づき、その機能を大きく進化させる新たな物理原理を研究し、量子中継の基盤技術の創製と、新たな半導体量子スピンフォトニクス分野の開拓を目指す。

●Ge量子ドット—ブルズアイ共振器量子インターフェース

量子インターフェースは、光子からスピンへ量子情報を変換し、メモリや量子計算の機能を備えた量子中継の根幹の技術である。本研究では、動作波長が光ファイバーの通信波長に整合し、スピン量子ビットとしての性能が高いGe正孔スピン量子ビットで量子インターフェースを実現することに挑戦する。波長変換を使わず通信波長で直接動作することはダイヤモンドNV中心など量子中継の他の候補に比べ大きな特徴となる。単一の光子偏光状態からGe量子ドット中単一正孔スピン状態への量子状態変換の基本原則を確立する。また光子からスピンへの量子情報の変換効率の大幅な増大はスピン量子ビットの量子中継応用への大きな鍵となる。この課題をフォトニック構造の技術を応用し、ブルズアイ型光学共振器を導入することで解決する。

●スピン量子状態発光デバイス

量子通信や光量子コンピュータでは量子光源は極めて重要である。従来は非線形光学材料や自己形成量子ドットなどが主流で、半導体スピンビットの土台であるゲート制御型量子ドットを用いた量子光源の報告はない。半導体スピンビットの持つ電荷・スピン状態の高い電気制御性を量子光源に応用できれば、オンデマンド量子光源や量子中継用もつれ光源など革新的技術の創製が期待される。本研究では面内LED構造に電気制御量子ドットを組み込むという独自のアイデアによりスピン量子状態発光デバイスの実現に挑戦する。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●ゲルマニウム量子ドットにおける光子—スピン量子インターフェース

Ge量子ドットにおいて光子偏光状態から正孔スピン状態への量子状態変換を提案し、実証する。Geは通信波長帯で直接動作することが期待できる点は他の量子中継器の候補にない大きな特徴である。さらにGeを使うことで、強いスピン軌道相互作用による高速スピン操作や同位体精製による正孔スピンのコヒーレンス時間に延伸や単一核スピンメモリなど、Ge量子ドットの特長を生かした優れた機能が付加できる。

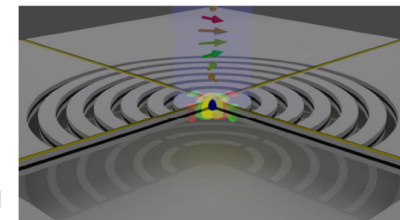


図2 ブルズアイ光学共振器

●ゲルマニウムスピン量子ビット—ブルズアイ共振器による高効率量子インターフェース

量子中継用の革新的量子インターフェースとして、通信波長帯で動作するブルズアイ共振器の設計と開発を行い、Ge正孔量子ドットをブルズアイ共振器へ導入することで光子から正孔スピンへの変換効率の大幅な増大を実現する（図2）。このためにSiO<sub>2</sub>上にGe量子井戸構造を積層したGOI（Germanium-On-Insulator）基板を実現する。さらにブルズアイ共振器中に量子ドット2次元アレイと電荷計を配置することで量子中継に必要なベル測定を実装する。

●スピン量子状態発光デバイス

電気制御性の高い半導体スピン量子ビットから光子偏光状態へ量子状態を変換する新しい量子光源の実現に挑戦する。面内LED構造へ平面型の電気制御量子ドットを組み込む構造を実現する（図3）電気制御性の高さを生かし、スピン数の制御により、単一光子源と2スピン状態からのもつれ光子対源の提案と実現に取り組む。

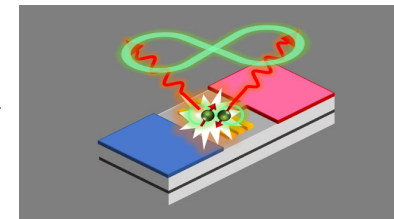


図3 スピン量子状態発光光源