

電気制御量子ドットを使った光子—電子スピン相互量子状態変換の研究  
Interconversion of Quantum States Between Photon and  
Electron Spin Using Electrically Controlled Quantum Dots

課題番号：17H06120

大岩 顕 (OIWA, AKIRA)

大阪大学 産業科学研究所・教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、ゲート制御量子ドットを中心に、平面 pn 接合を融合させた量子発光素子や、Ge 系スピンバルブ素子を開発し、光子偏光と電子スピンとの相互量子状態変換ともつれ相関変換の確立を目指す。これらの研究により、もつれ光子源や量子中継プロトコル、量子回路中の量子光インターコネクションなどで新しい量子技術をもたらし、量子情報処理の発展に貢献する。

研究分野：半導体低次元物性、量子技術

キーワード：電子スピン、光子、量子状態変換、量子ドット、面内 pn 接合

1. 研究開始当初の背景

量子力学に基づく量子情報通信や量子計算は、21 世紀の高度情報社会を支える絶対に安全かつ大容量情報処理技術として重要なだけでなく、物理学の英知を集めた最先端研究である。最近では、これまで個別に研究されてきた、量子通信を担う光子と、量子計算を担う電子スピンや超伝導量子ビットなど固体中の量子を結合させる量子状態変換の研究の重要性が急速に高まっており、量子情報の長距離伝達に不可欠な量子中継器の基盤技術として応用が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、固体量子として電気制御 GaAs 量子ドット中の単一電子スピンと情報伝送を担う単一光子の偏光状態との間で相互量子状態変換の研究を行い、革新的技術を融合した量子中継や新しい量子光源など量子情報と固体物理でインパクトのある新しい成果を達成する。

3. 研究の方法

ゲート制御 GaAs 量子ドットを使い、光子から電子スピンへの量子状態変換と離れた 2 つの量子ドット中のスピン間へのもつれ相関変換の実証に取り組む。そのための量子ドット素子開発や新しいスピン操作の研究も行う。さらに平面 pn 接合と電気制御量子ドットを融合した新しい単一光子発光素子を開発し、電子スピンから光子への量子状態変換を実現する。またスピンコヒーレンス時間が長く量子メモリとして期待される IV 族半導体素子での光スピン変換技術も開発する。

4. これまでの成果

これまで、単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換のための高速電子スピン操作・電荷検出系の構築・アンドープ量子ドットの実現、そして IV 半導体 Ge 系への光スピン変換の展開、さらにゲート制御量子ドットと平面 pn 接合を組み合わせた単一スピン—単一光子へ変換する発光素子などの課題に取り組み、主に以下の成果を上げた。

① 単一光子—単一電子スピン間量子状態変換の部分的実証

GaAs ゲート制御量子ドットにおいて量子状態変換の理論提案[Vrijen Phys. E 2001]の条件を実現し、面内（光の進行方向と直交方向）磁場に対して平行と直交する直線偏光単一光子により、磁場と平行と反平行の単一電子スピンの励起されることを、パウリ排他律を使った独自の光生成単一電子スピン検出法 [1] を用いて観測した [2]。この偏光と光生成電子スピンの対応は、量子状態変換ができていることを強く示唆している。この研究は東京大学（当時）樽茶教授らとの共同研究で行った。

② 高速電子スピン操作の実現

量子状態変換やもつれ変換の実証には、スピン回転により観測基底を変換するスピン状態トモグラフィが必要である。この回転操作を電子スピンのコヒーレンス時間よりも高速に行うため、三重量子ドット中のドット間トンネルを使い距離振幅を大きくすることで、スピン軌道相互作用を介した高周波電場駆動型のラビ振動を 200MHz 台まで伸ばすことに成功した。GaAs 三重量子ドットに電荷検出器

を配した試料に対して、本研究で導入した無冷媒希釈冷凍機中で、バーストマイクロ波パルス印加と単一スピンの単一ショット読み出しを組み合わせた測定を行い、単一ドット内では5MHz、電子振動を二重量子ドットに拡張して25MHz、さらに、三重量子ドットでは200MHzと、ラビ周波数が大幅に増大する結果を得た(図1)。このように距離振幅を増大させることで、桁違いの高速化を実現し、報告されているGaAsのスピンコヒーレンス時間より短い操作が、単純な素子構造で実現されたという点で、もつれ相関の変換など様々な量子操作の実現性を高める重要な価値を持つ。

この実験に先立ち、高周波反射による高感度電荷検出測定系の構築を行った。その確認実験として、通信波長帯での光子-電子スピン変換へ応用が期待できるInAs自己形成量子ドットで初めて電荷検出に成功した[3]。

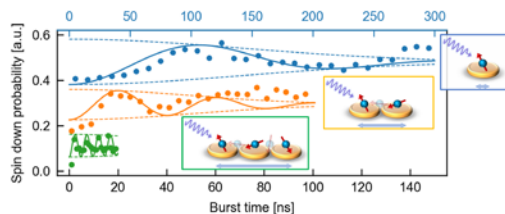


図1：各量子ドット数(単一、二重、三重)の中で電子が振動するように調整した条件において測定した電子スピンラビ振動。

### ③ アンダープレ量子ドットの開発

ゲート制御量子ドットを形成するGaAs/AlGaAs 2次元電子系では、Si不純物はAlとの複合欠陥(DX中心)を形成し、特に照射下でイオン化すると、量子ドットの精密な電圧調整条件を刻々と変化させ、長時間の精密な光生成電子スピン検出を妨げる。そこでSi不純物を添加しないアンダープレ量子井戸基板を使い、オーミック電極の形成方法を確認し(図2左)、ゲート電圧で2次元電子と量子ドットを形成することに成功した(図2右)。さらにLEDによる光照射効果から、界面準位と半導体中の背景不純物の影響を明らかにし、長時間の光子照射実験でも安定して高度な光生成電子スピン検出やスピン操作の実験を効率的に行う素子を導入する目途があった。これは本研究課題の一つである平面pn接合のn型領域を実現した成果でもある。

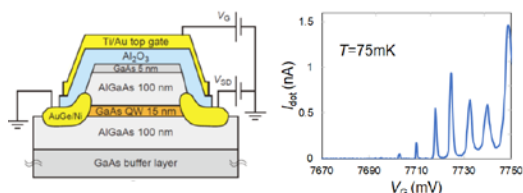


図2：(左)アンダープレ量子量子井戸の断面構造。(右)トップゲート電圧で誘起されたクーロン振動

### 5. 今後の計画

光子から電子スピンへの量子状態変換の部分実証に基づき、今後は、光子対から離れた2つの量子ドット中の電子スピンへのもつれ相関変換の研究により注力する。高速電子スピン操作を使ったトモグラフィ測定を利用して量子相関の検証を行う。アンダープレ量子ドットを導入して、実験の効率化を図る。電子スピンから光子への量子状態変換による量子光源の課題では、早々にアンダープレ量子井戸に対するp型オーミック電極を確立し、ゲート制御量子ドットを含む平面pn接合を実現する。その発光特性から、注入される量子ドット中の電子スピンと発光偏光の相関を明らかにし、電子スピンから光子偏光への量子状態変換を示すことを目指す。

### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

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, Nat. Commun., **10**, 2991 1-6, 2019.
2. 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, Photogeneration of a single electron from a single Zeeman-resolved light-hole exciton with preserved angular momentum, Phys. Rev. B, **99**, 085203-1 - 085203-5, 2019.
3. H. Kiyama, A. Korsch, N. Nagai, Y. Kanai, K. Matsumoto, K. Hirakawa, and A. Oiwa, Single-electron charge sensing in self-assembled quantum dots, Sci. Rep., **8**, 13188-1 - 13188-6, 2018.
4. 大岩 顕, 藤田 高史, 木山 治樹, 黒山 和幸, 松尾 貞茂, 樽茶 清悟, ポアンカレインターフェース - 単一光子偏光から単一電子スピンへの量子インターフェース, 光学, **47**, 148-154, 2018.
5. K. Hamaya, Y. Fujita, M. Yamada, M. Kawano, S. Yamada, and K. Sawano, Spin transport and relaxation in germanium, J. Phys. D: Appl. Phys., **51**, 393001-1-17, 2018.

受賞

藤田高史(分担者) 第18回FFIT研究奨励賞  
船井情報科学振興財団

木山治樹(分担者) 第16回FFIT研究奨励賞  
船井情報科学振興財団

### 7. ホームページ等

大岩研究室 HP :  
<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qse/index.html>