The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	単一電子スピンCCD
Author(s)	藤田, 高史
Citation	大阪大学低温センターだより. 2019, 169, p. 2-6
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76733
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

研究ノート

単一電子スピンCCD

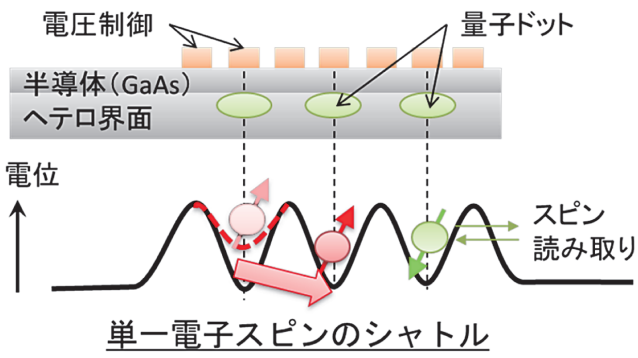
産業科学研究所　藤田 高史
E-mail: fujita@sanken.osaka-u.ac.jp

1．概要

半導体集積回路の素子として、電荷の状態を伝達する電荷結合素子（Charge Coupled Device）が存在します。特に受光素子と組み合わせたイメージセンサーとしての用途が広く認知されており、その利点として、電荷増幅器が少数でも高感度を保つことや、配線面積が少ないことなどが挙げられます。本研究ノートで紹介する単一スピンCCDは、上記の室温素子で使われる電荷の塊の移動とは異なり、単一の電子を扱い、さらにはその電子が持つスピンの性質を運ぶことを目的としています。素子の単位であるピクセルに見立てた半導体量子ドットに単一の電子スピンを閉じ込め、トンネル結合した異なる量子ドットの間でスピンを輸送する、スピンシャトルの実験を行いました。結果としてスピン状態は半導体中を80ミクロン以上(500ピクセル分)移動したとしても、シャトルによるスピン緩和への影響は観測されないほど小さくなることが確認できました。以上のように単一電子スピンを効率よく、さらには独立に複数個を読み取れることなどの性質から、スピンシャトル技術は今後の量子計算機の集積化や、光学素子として量子通信を中継するインタフェースの基礎になることが期待できます。本研究は、液体ヘリウム(3He/4He混合)を活用した希釈冷凍機を用いて、オランダ・デルフト工科大学・Vandersypen研究室の下で実現されました[1]。

2．半導体量子ドットに閉じ込められた単一電子スピン

量子情報処理は、従来の計算機に比べて桁違いの処理能力を有する量子計算機、盗聴のおそれのない量子通信などへと応用できることから、次世代の情報処理技術として注目を集めています。量子情報の基本単位は量子ビットと呼ばれ、量子力学的に定義される二準位系を取り扱います。その



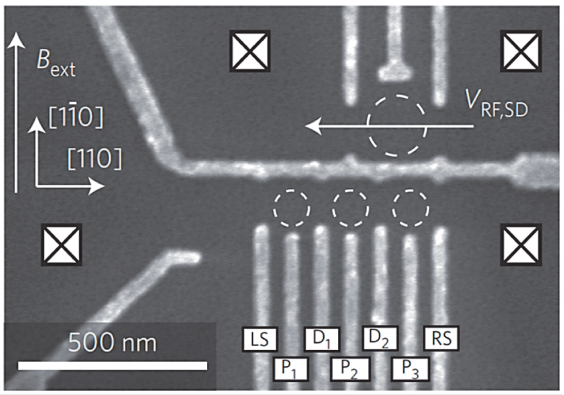


図1.（左）半導体界面に形成した量子ドット列と、そのエネルギー状態図を使って表したスピンシャトルの模式図。（右）測定された3重量子ドット構造の電子線顕微鏡写真。

中でも、多数の量子ビットへと集積化が可能な固体中の電子スピンは、磁場の方向に対して平行か反平行かという、単純な二準位系を構成することができ、将来爆発的に拡大するであろう量子情報を担う有力な候補とされています。

半導体量子ドットで電子スピンを扱う大きな利点の一つは、スピンが電気的に制御可能になるということです。単一電子スピンという非常に小さな磁化を磁場操作により制御するのは非常に困難であるため、次のような電圧制御によって実現されてきました。単一電子スピンを操作するときは、電子スピンの二準位間に発生するゼーマン分離（基底準位の↑スピンと、励起準位の↓スピン間のエネルギー差EZ）に対応する高周波電圧（f = EZ / h ~ 数10GHz相当）を、極低温の環境下に挿入します[2]。単一電子スピンを読み取るときは、スピン分離に対する基準としてフェルミ準位を隣接させ、ドットに留まる基底の↑スピンと、ドットから抜け出すことのできる励起スピンの↓スピンとを区別します[3]。

量子ビットの数を増やすにつれ、全ての量子ビットに対してこれまでと同等の精度の良い制御を保つ必要があります。そのためにビット操作や読み取りのために高性能の制御装置が、量子ビットの数だけ使用されてきました。このような加算方式では、将来的にリソース不足に陥る可能性があります。またスピン読み出しについても、大きな電子溜がスピンに隣接している必要があるため、多ビット化したときに内側に配置されたスピンは読み取ることができなくなります。そのため過去の結合量子ドットでの研究は、二重量子ドットというコンパクトな物理系に留まることが多く、容易に拡大されることはありませんでした。単一電子スピンを空間的に運ぶような輸送技術が存在すれば、精密な操作や、読み出し、或いはメモリーとして保持することが可能な位置まで量子ビットを移動させることが可能になり、量子ビットの数を増やすごとにかかるコストが大幅に軽減されます。

電子スピンの移動に直接利用できるのがトンネル効果です。トンネル結合は、隣り合った量子ドットの間でキャリアの波動関数が重ね合わさることで発生します。半導体量子ドットでは、トンネル結合力を利用して電荷量子ビットとしての電荷状態の制御や、2スピン間のもつれ状態を形成するためのゲート操作などが実現されています。電荷の移動に利用するのであれば、結合した量子ド

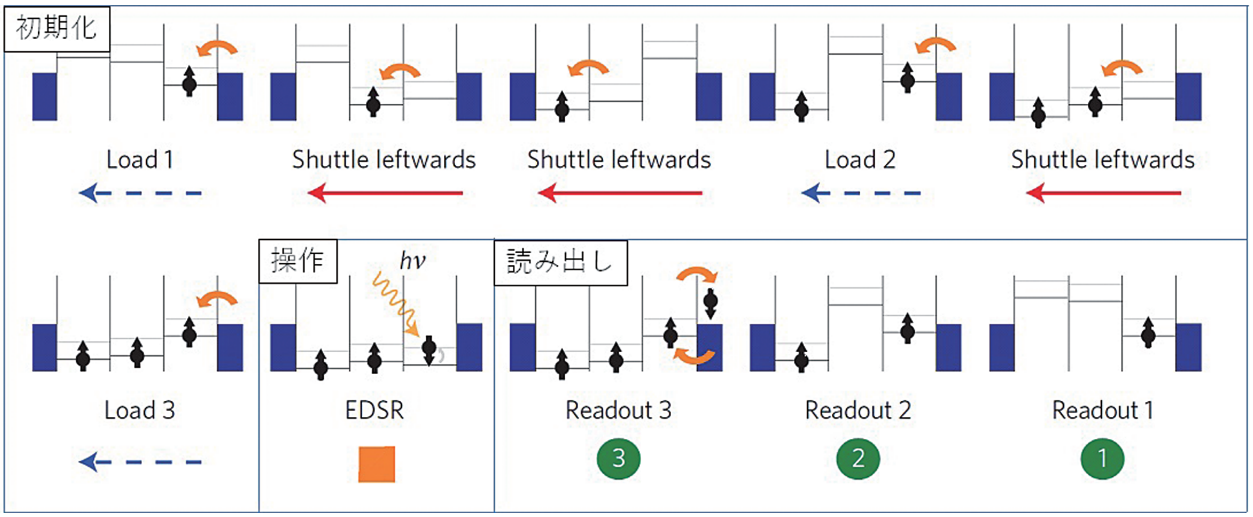


図2. スピンシャトルと組み合わせて3スピンを独立に初期化、読み出すために設計された電圧の時間操作に対応する、エネルギー準位の模式図。

ットの内、片方のドット内の電子準位を、隣の準位よりも高く設定することで、電荷のエネルギー的な緩和に合わせて電荷は一方向に移動します（スピンシャトル）。このトンネル結合を使った輸送の原理は、通常のCCDにあるようなゲート操作に類似しています。我々は量子ドットを低温に冷やすことで、熱雑音や暗電流を防ぎながら、単一の電荷を精度よく移動させ、最終的にそのスピン状態について観測を試みました。この時に必要なゲート電圧操作は単純な線形出力でよいため、比較的単純な機能を有するゲートを使って、電荷移動のための量子ドット列の構成が可能になります。以下でより詳しく、量子ドットで行った実験について解説していきます。

３．単一スピンCCD

まずはスピンCCDの原型として、3つの量子ドットを1列に並べた三重量子ドットを用意しました。GaAs/AlGaAsの半導体2次元界面の構造の上に、金属のゲート電極（図1右の白い像）を作成し、これらに所定の電圧を印加することで、電極の下の領域を空乏化し、目標の位置に3つのドット（図1右の丸破線）を形成します。それぞれのドットにはスピン1/2の単一電子が入るように電極の幅や必要な電圧範囲が設計されています。一方ドット列の反対側、上部にはもう一つ量子ドットが形成されており、ここの伝導率を測ることにより、ドット列の電子数を間接的に測ることが可能になっています。この電荷状態を時間的に分析することで、スピンの状態の測定に利用します。外部磁場は3.51Tを印加し、ゼーマン分離（87μeV）でスピン上状態と(↑)、スピン下状態(↓)の2準位系を定義します。雑音を入れ込んだ電子温度の値は75mKと推定され、十分スピン分離が保たれています。

三重量子ドット以上では、電子スピンの初期化及び各スピンの測定の際にスピンシャトルが必要になります。図2に、三重量子ドットの各ドットに単一のスピンを初期化し、独立に読み出す手順を模式的に示しています。右のドットを介して、電子状態が(1,1,1)になるようにCCD方式で電荷を移動させ、読み取りの際は逆方向に移動させます。実際に各ゲートに印加する電圧を決めるときは、ゲート電圧を座標とした電子状態の地図をあらかじめ記録しておきます。その後、電荷の移動を順

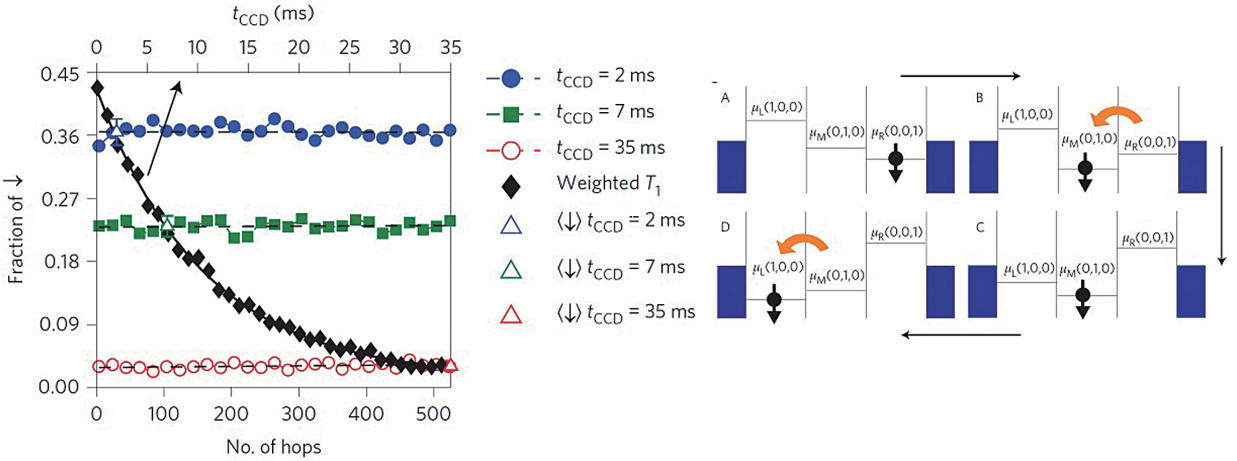


図3.（左）単一電子スピンのシャトルを500回にわたって施行しても、観測されたスピン成分が変化しなかった様子を示した結果。ひし形点の示す指数緩和は基準となる予測された励起スピンの割合。その他の点は、それぞれの基準時間内に含ませたシャトル回数を横軸として描画されている。（右）上記連続シャトル実験の際のエネルギー準位変化の模式図。

番に行うように電圧を時間変化させます。スピンの励起状態を用意するときは、エネルギー的に低い基底状態の↑スピンを自然に用意した後、高周波操作によって↓スピンを励起します。スピンの読み取りに関しても右のドットのみで行いました。一つ目のスピンを右のドットで直接読み取った後、真ん中の電子スピンを次に右に移動させます。同じ手順で2つ目のスピンとして読み出し、続けて左の電子スピンを右方向へ移動させ、再び右のドットの中で読み出します。最終的に3つのスピンを独立して一斉に読み出すことに成功しています。

図3には、500回以上のシャトルでもスピン状態が保持された様子を示しています。この実験ではシャトルの手順にかける全体の時間を固定したまま、その時間内でシャトルする回数だけを変化させました。こうすることで、背景にあるスピン緩和の影響を無視し、スピンシャトルの際にスピンが受けた影響を議論できます。結果として80ミクロン以上移動させてもスピンへの影響は観測されないほど小さく、雑音に対する耐性も保持できているということが分かりました。ただし、この結果から単純に500個の電子スピンが使えるというわけではなく、まだ各スピンを読み取るまでの時間が長いので、背景のスピン緩和が誤りの原因となります。考察の結果、半導体の材料をSi系に移すことで、緩和時間を延ばすことや、シャトル手順の最適化、スピン読み出し方法の改良など、まだまだ改善の余地が残されていることが示せました。スピンの初期化、操作、読み出しにスピンシャトルが利用できるということから、今後量子ビットの集積化に必ず組み込まれる技術となると期待しています。

４．今後の展望

スピンシャトルの概念、及びそれで実現される単一スピンCCD的なスピン読み出しは、その後物理の基礎研究に利用され、今後も長距離輸送の応用へと研究が広がっていく可能性があります。この技術の実現により、多数の電子スピンが結合した複雑な量子状態に対する測定も可能になっており、新奇のスピンもつれ状態をシミュレートした系が検証可能になっています[4,5]。また今回の結果をより一般的な量子状態の輸送へと広げると、重ねあわせ状態にあるスピンを輸送することが可能になり[6]、例えば量子計算の最中にある量子ビットを、その計算がより効率良くなるように再配置することが容易になります。従来のイメージセンサーとの類似性に照らし合わせれば、効率の良い量子ビットの受光素子として利用することも考えられます。光子との結合が実現されれば、量子通信の分野でも長距離化に寄与できることが見込まれており、より大規模に量子情報をつなげられる可能性が出てきます。スピンシャトルという基礎的な技術が、量子情報の将来的な発展に寄与することを期待して本研究ノートの締めとさせていただきます。

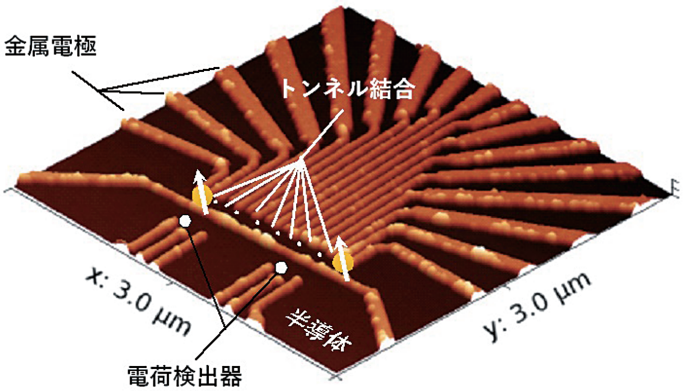


図4. 8重量子ドットの原子間力顕微鏡写真。スピンCCD技術が測定の鍵となる。

参考文献

[1] T. A. Baart *et al*. Single-spin CCD. *Nature Nanotechnology*. **11**, 330 (2016).

[2] K. C. Nowack *et al*. Coherent control of a single electron spin with electric fields. *Science* **318**, 1430 (2007).

[3] J. M. Elzerman *et al*. Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot. *Nature* **430**, 431 (2004).

[4] T. A. Baart, T. Fujita *et al*. Coherent spin-exchange via a quantum mediator. *Nature Nanotech*. **12**, 26 (2016).

[5] T. F. Watson *et al*. A programmable two-qubit quantum processor in silicon. *Nature* **555**, 633–637 (2018).

[6] T. Fujita *et al*. Coherent shuttle of electron-spin states. *npj Quantum Information* **3**, 22 (2017).