

NEWS LETTER

Vol. **07**

2012年8月1日

文部科学省科学研究費補助金
新学術領域研究（領域提案型）
領域代表者／独立行政法人 理化学研究所
蔡 兆申（ツァイ ツァオシェン）

QUANTUM CYBERNETICS

量子サイバネティクス

[量子制御の融合的研究と量子計算への展開]

<http://www.riken.jp/Qcybernetics/index.html>



QUANTUM
CYBERNETICS

目次

文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究
「量子サイバネティクス ― 量子制御の融合的研究と量子計算への展開」

研究項目

<超電導系>	研究代表者: 蔡 兆申 独立行政法人理化学研究所	2
<半導体系>	研究代表者: 都倉 康弘 筑波大学	2
<分子スピン系>	研究代表者: 北川 勝浩 大阪大学	3
<冷却原子系>	研究代表者: 高橋 義朗 京都大学	4
<イオントラップ系>	研究代表者: 占部 伸二 大阪大学	4
<光子量子回路系I>	研究代表者: 竹内 繁樹 北海道大学	5
<光子量子回路系II>	研究代表者: 小芦 雅斗 東京大学	6

2012年度公募研究採択課題

<トポロジー符号化された量子計算のためのコンパイラ>		7
	研究代表者: デビット サイモン 国立情報学研究所	
<電子スピンのコヒーレント初期化の研究>		8
	研究代表者: 舩本 泰章 筑波大学	
<シリコン量子ビット実現に向けた要素技術の開発と関連物理の解明>		8
	研究代表者: 小寺 哲夫 東京工業大学	
<量子コヒーレント状態の制御検出における非平衡量子統計熱力学の理論研究>		9
	研究代表者: 内海 裕洋 三重大学	
<長距離電子スピン状態転送を実現する荷電状態制御単一光子素子の研究>		9
	研究代表者: 中岡 俊裕 上智大学	
<光合成蛋白における生体分子スピン系の量子情報操作に向けた研究>		10
	研究代表者: 松岡 秀人 東北大学	
<ダイヤモンドNV中心における量子情報の電氣的制御に向けた研究>		10
	研究代表者: 水落 憲和 大阪大学	

<研究項目A: 固体素子系量子サイバネティクス>

計画研究 A01: 超伝導量子サイバネティクスの研究

研究代表者／蔡 兆申（独立行政法人理化学研究所・チームリーダー 及び NEC スマートエネルギー研究所・
主席研究員）

ー 磁束量子ビットのラビ振動の緩和率測定による磁束ノイズスペクトルの評価

磁束ノイズスペクトルは磁束量子ビットの spin-echo や動的デカップリング測定により評価されており、数 10 MHz まで $1/f$ 依存性を持つことが知られている。一方、磁束量子ビットの Rabi 振動の緩和率測定より Rabi 周波数における磁束ノイズスペクトルを評価できる。ただ、高い Rabi 周波数の Rabi 振動を測定しようとする、大きな振幅の振動磁束を磁束量子ビットの超伝導ループにかける必要がある。その結果、読み出しや制御のため回路および周囲の環境が励起し、緩和率の測定を行うのは困難になる。

我々は今回の測定で、磁束量子ビットとチップ上のマイクロ波線との結合を通常より 10 倍以上大きくした。その結果、比較的弱いマイクロ波電流で周囲の環境を励起することなく磁束量子ビットを強くドライブすることが可能になり、2.7 MHz から 1.7 GHz までの広い範囲の Rabi 周波数を持つ Rabi 振動を観測できた。それぞれの Rabi 周波数における磁束ノイズスペクトルを評価し、(1)300 MHz まで磁束ノイズスペクトルが減少すること(2) 30 MHz に肩があるローレンツ型のスペクトルが見られることを観測した。

計画研究 A02: 半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究

研究代表者／都倉 康弘（筑波大学数理物質系物理学専攻・教授）

ー 量子ビット化のための 4 重量子ドット作成

多ビット化の技術開発を目指して 3 重、4 重 GaAs 量子ドット(図1)を作製し、各ゲート電圧の関数として電子状態が制御できることを確認した。トンネル結合 4 重量子ドットは初めての実現例である。また、3 重量子ドットでは、ゲート電圧を調整して、各ドットに 1 個の電子を含む(1,1,1)状態(=3 スピン量子ビットに必要な電子状態)が実現できることを確認した。今後、3、4 重ドットに微小磁石を装着し、それぞれ、3、4 量子ビットに相当する電子スピン共鳴実験を行う。

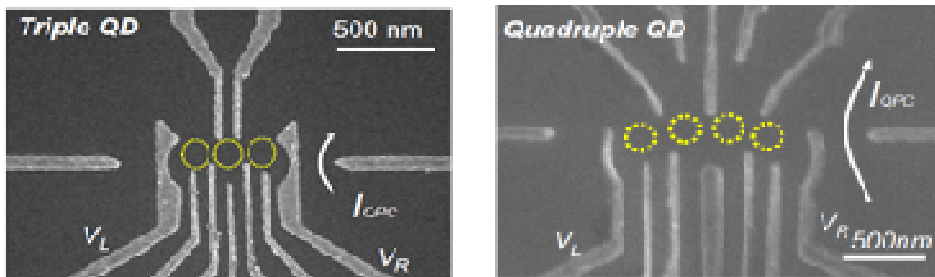


図1 作製した 3 重(左)、4 重(右)量子ドットの電子顕微鏡写真。

ー 低ノイズ素子の作製

GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を用いて作製される電荷量子ビットやスピン量子ビットは、電荷ノイズにより量子ドットの準位が揺さぶられ、デコヒーレンスやゲートエラーを引き起こすことが知られている。これまでの報告から、電荷ノイズは印加するゲート電圧を負側に大きくするのに伴って増大することが知られており、素子中に存在するトラップサイトを介した表面ショットキーゲートからのトンネリングに起因すると考えられている。今回は、GaAs/AlGaAs ウェハを用いて量子ポイントコンタクト(QPC)を作製し、QPC 電流におけるノイズ量を評価した。ノイズの起源を明らかにするために、ウェハの層構造と、素子作製プロセスの組み合わせを変えながら、素子作製を行った。従来の報告にあるようなゲート電圧依存性のある電荷ノイズは、高損傷プロセスを行った時にのみ現れ、低損傷プロセスの場合には、ウェハの層構造やドーピング方法に関係なく、ノイズ量はゲート電圧の大きさに依存せず一定であった。また、ウェハの AlGaAs バリア層の中に GaAs/AlAs 超格子構造を入れると、高損傷プロセスにおいても電荷ノイズ量は、ゲート電圧の大きさに依存せず一定となることが分かった。このことは電荷ノイズのゲート電圧依存性はウェハ固有のものではなく、素子作製プロセスに起因すること、超格子構造を入れることによって電荷ノイズの原因となるトラップサイトが素子中に生じにくくなることを示している。

〈研究項目 B: 分子スピン量子サイバネティクス〉

計画研究 B01: 分子スピン量子制御

研究代表者／北川 勝浩（大阪大学大学院基礎工学研究科・教授）

ー 超伝導巨視的 Qubit と結合する、アンサンブル基底 3 重項有機分子の合成、単結晶作製及びスピン物性の同定

化学的に安定で通常的环境下で取り扱え、超伝導(QC) qubit と結合できる程度の大きさのゼロ磁場分裂定数をもつ、有機 biradicals(Nitroxide-Substituted Nitronyl Nitroxide and Iminonitroxide)を設計・合成し^[1]結晶構造及び磁氣的テンソルなどのスピン物性を同定した。巨視的超伝導 qubit とのスピン(spin)qubit との結合は、量子演算は QC qubit で行い spin qubit にメモリーの役割を待たせるアプローチから注目され、ダイヤモンドNVセンターの三重項状態に関する報告がなされてきた^[2]。QC qubit と結合するスピン系には、(1) spin qubit 系が電子的基底状態において適当な大きさのゼロ磁場分裂定数をもつこと、(2) その大きさが外部パラメータによって tunable であること、(3) 微視的な分子スピン物性としてのゼロ磁場分裂テンソルの起源が明らかであること、(4) アンサンブル系としてスピン数が制御できること、(5) 極低温から広い温度領域にわたって物質として安定であることなどが要請される。今回、これらの条件を満足する、有機 biradical の単結晶を作製した。また、結合の微視的な由来を明らかにするためには、条件(3)が特に重要になるので、実験的にゼロ磁場定数の絶対符号を決め、さらに精緻な量子化学計算を行って、ゼロ磁場分裂テンソルに対する、スピン-スピン相互作用及びスピン-軌道相互作用の寄与を評価した。

[1] S. Suzuki, T. Furui, M. Kuratsu, M. Kozaki, D. Shiomi, K. Sato, T. Takui, and K. Okada, "Nitroxide-Substituted Nitronyl Nitroxide and Iminonitroxide", *J. Am. Chem. Soc.*, 132, pp.15908-15910 (2010). ([DOI: 10.1021/ja107769z](https://doi.org/10.1021/ja107769z))

[2] X. Zhu, S. Saito, N. Mizuochi, K. Semba et al., "Coherent coupling of a superconducting qubit to an electron spin ensemble", *Nature*, 478, 221-224 (2011).

<研究項目C：原子イオン系量子サイバネティクス>

計画研究 C01：冷却原子を用いた量子制御

研究代表者／高橋 義朗（京都大学大学院・教授・原子物理学）

本研究では、レーザー冷却された中性原子を光格子に導入した系を用いた量子計算や量子シミュレーション、量子計測、および核スピン集団を用いた量子フィードバック等の量子系の制御技術の開発を目指している。研究の進捗状況は以下の通りである。

まず、光格子中の単一サイトの原子の観測および制御は、量子シミュレーションにおいて全く新しい可能性をもたらす。その実現に向けて装置の開発を行った。まず、対物レンズ直下において生成した鉛直方向に強く閉じ込められた2次元ボース・アインシュタイン凝縮体について、さらに、水平面内に光格子ポテンシャルを印加することで、2次元での超流動—モット絶縁体転移を観測することに成功した。さらに、強い電気双極子許容遷移および弱いスピン禁制遷移からなる光モラセスを構成して、それからの発光を、対物レンズにより観測することに成功した。

また、原子間相互作用を自由にコントロールすることは、量子シミュレーションにとって必須の技術といていい。我々が対象としているイッテルビウム原子のような2電子系原子の基底状態には超微細構造がないため、いわゆる磁場フェッシュバハ共鳴現象は期待できなかった。最近、我々は、質量数170と174の二つのボース同位体について、異方的相互作用に起因する磁場フェッシュバハ共鳴現象が、基底状態と準安定励起状態の間に働くことを見出した。これはボース・アインシュタイン凝縮状態にある原子を光格子中に導入し、モット状態中の2重占有のサイトについての高分解能分光を行い、そのスペクトルシフトの詳細な考察から磁場フェッシュバハ共鳴を同定することに成功したものである。この機構は、フェルミオンを含む他の同位体や、準安定状態イッテルビウム原子と基底状態リチウム原子についても同様に働くと思われるため、今後、これを発見し、様々な研究に応用したいと考えている。

計画研究 C02：開放型イオントラップ系による量子情報処理

研究代表者／占部 伸二（大阪大学大学院基礎工学研究科・教授）

3個のイオンを用いて Dicke 状態の生成と評価を行った。エンタングル状態の一種であるディッケ状態は、測定や粒子ロスに対してロバストであるというような特徴を持ち、精密測定への応用も期待されている。ディッケ状態の生成方法のみならず、その評価方法に関しても今なお議論が進行中である。ディッケ状態は高い対称性を備えるため、全角運動量などのグローバルな観測量を用いて評価すれば、見通しの良い議論が可能となりまた測定のコストも抑えることができる。これまでのディッケ状態の生成実験では個別の操作や測定をとまなう量子トモグラフィーにより評価が行われていたが、今回、グローバルな観測量のみを用いて 3 粒子系のディッケ状態(W 状態)のフィデリティの上限・下限を表す不等式を導出し、これを用いて実際に実験的に得られた 3 イオン系のディッケ状態の評価を行った。結果として、ディッケ状態が生成されたことを証明することに成功した。この他、開放型プレーナートラップにおいて、ナノ光ファイバー近傍のエバネッセント波とイオンとの結合を試みる実験、および微小な永久磁石をプレーナートラップに組み込むことで高磁場勾配をもつ領域を形成しクーロン相互作用を介した疑似的なスピン間相互作用を生成する実験の準備を進めている。

<研究項目D: 光系量子サイバネティクス>

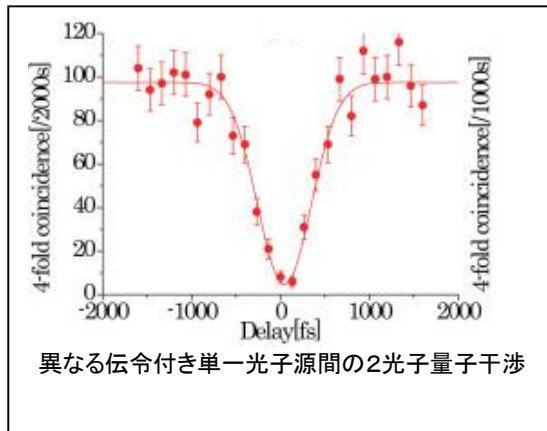
計画研究 D01: 光子量子回路による量子サイバネティクスの実現
研究代表者/竹内 繁樹 (北海道大学電子科学研究所・教授)

光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェイスが容易です。また、これまでに線形光学素子と射影測定を組み合わせた最大規模の量子回路を実現されています。私たちの計画班では、量子サイバネティクスの概念に基づく量子制御複合テストベッドを実際に構築、最適な量子情報制御の創出とともに、異種量子間量子状態制御の実現や、量子制御内蔵光デバイスの創成も目指しています。

線形光学量子計算では、2光子量子干渉と呼ばれる光子間の量子干渉効果が重要な役割を持ちます。これは、全く見分けがつかない2つの光子が半透鏡に入射した際に、「両方の光子が共に反射するプロセス」と、「両方の光子が共に透過するプロセス」が干渉の結果互いに打ち消し合い、結果として2つの光子は、半透鏡の片側から共に現れるという現象です。この現象は、量子暗号の長距離化を目指す量子リピーターや、量子計測などでも重要になります。これらの応用に向けて、高い2光子量子干渉性(明瞭度)を実現可能な、伝令付き単一光子源の構築はとても重要です。

今回、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源において、高い同一性を実現するための条件を理論、実験の両面から明らかにしました。これまでの解析では、ポンプ光が結晶内を伝搬するとき、光子対の発生確率は、結晶内のどの場所でも均一であると仮定されていました。私たちは、結晶内でポンプ光が伝搬するに従って、光子対の発生数が線形的に増えていくことを考慮にいれ、理論を拡張しました。この拡張された理論を用いると、結晶長が1.5mm 以上である場合、これまでの理論結果との差が顕著に現れることがわかりました。次に、私たちは、結晶内の群速度不整合の効果を実験的に検証しました。その結果、拡張された理論に基づき数値計算を行った結果と、実験結果がよく一致することが確認でき、また、 $95.8 \pm 2\%$ という高い明瞭度を達成しました。これは、これまでの既報告最高値と同じながら、4光子の同時計数率は4倍に向上しています。この光源をもちいる事で、量子制御のための光量子回路のエラー低減が期待できます。

[1] M. Tanida, R. Okamoto, S. Takeuchi, Optics Express 20, 15275 (2012).

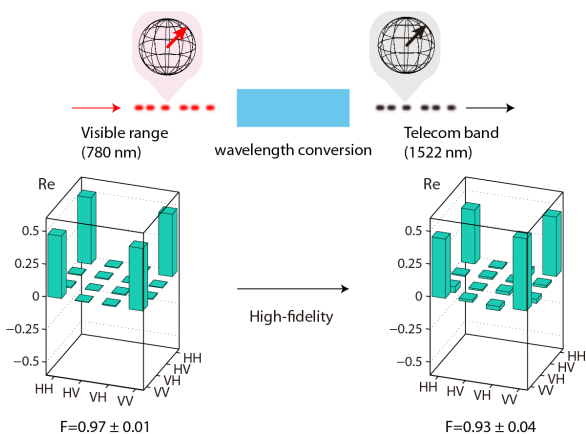


計画研究 D02: 光を基軸とした多キュビット量子制御

研究代表者／小芦 雅斗（東京大学大学院工学系研究科附属光量子科学研究センター・教授）

量子情報処理や量子通信において、光子の波長を量子レベルで変換する量子インターフェースの技術は重要であり、特に、赤外領域の通信波長帯への変換は、量子情報を長距離光ファイバーのネットワークでやりとりするために必須である。導波路構造を持つ光非線形結晶は、この用途の実現に適した特長を持ち、とくにその広帯域性は高速の量子情報処理に適している。しかし、強い励起光のラマン散乱によるノイズのために、変換の忠実度はこれまで低く抑えられていた。

今回我々は、NICTとの共同研究で、新たに開発した可視および通信波長帯用の超伝導単一光子検出器(SSPD)の使用により、ほとんどノイズのない波長変換を達成した。SSPDは低い暗検出率と小さな検出ジッターを持ち、特に後者の特性は、量子情報を載せた光子のパルスモードだけを選択的に観測することを可能にした。その結果、90%を超える高い忠実度が得られた。



<2012年度公募研究採択課題>

研究課題 02: トポロジー符号化された量子計算のためのコンパイラ

研究代表者/デビット サイモン (国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系・特任助教)

— The Construction of Fault-tolerant Topological Circuits.

Large scale quantum computing architectures are essentially massive error correcting machines. While quantum algorithms are run on these machines, the majority of hardware resources are dedicated to correcting the inevitable errors occurring in the hardware. Programming such a machine is a complicated task and needs to be done effectively to reduce the number of devices needed for a large scale computer. The error correction method we utilize is that of topological cluster state codes. In this model, algorithms are represented as a large array of 3D geometric shapes. The way these shapes more around each other define the error corrected algorithm run on the computer. The goal of optimization is to compactify these structures into a smaller 3D space, reducing both the time required for computation and the number of qubits.

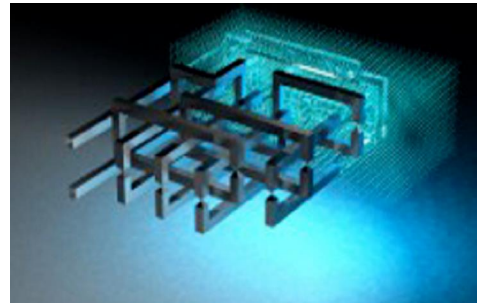


Illustration of a quantum algorithm in the Topological cluster model. The geometric shapes exist within a 3D space of qubits created by the quantum hardware.



Current version welcome screen for the puzzle game quantum blocks which converts our abstract optimization problem into a publicly downloadable game

QUANTUM BLOCKS: Our first attempt to provide a solution to this problem is to program and publicly release a puzzle game that the general public can download and use on their iPhone, iPad and desktop computer. This game will convert the abstract problem into something that can be understood by the general public and consequently may provide us with interesting solutions that would not be found using more standard techniques. Quantum Blocks is currently in the Alpha stage of development and will hopefully be released towards the end of 2012.

研究課題03: 電子スピンのコヒーレント初期化の研究

研究代表者/舩本 泰章 (筑波大学数理物質系物理学域・教授)

半導体量子ドット中の電子スピンは量子ビットとして働き、集積性の高い固体量子ビットとして量子演算・量子情報処理への応用に直結している。量子ドット中に局在するために長い緩和時間を持つ電子スピンは、高速で多数回の量子演算を可能にし、量子通信の媒体となる光との整合性が良いスピン量子メモリーとしても働く。本研究は、超短パルス光によるトリオンのコヒーレントスピン操作を通じて、スピン量子演算やスピン量子メモリーのための電子スピンの初期化と操作の研究を格段に進展させることを狙ったものである。

1個の電子をドーピングしたチャージチューナブルInP/InGaP量子ドットでの時間分解カー回転により、電子スピンのコヒーレント才差運動を観測し、才差運動の開始の振幅の大きさや向き、円・楕円偏光パルスの楕円率や強度、バンド幅を変えて調べ、それぞれ2個のスピン状態からなる電子とトリオンの4つの準位を基底とした密度行列の時間変化を記述するマスター方程式に緩和項をいれたシミュレーション計算と比較検討して、電子スピンの初期化と緩和について研究した。強励起下ではトリオンの寿命をはるかに上回るスピン緩和時間が観測され、また、励起強度に依存して電子スピン才差運動の位相の反転と緩和時間の変化が観測された。励起強度に依存した現象は緩和項に従来のスピン位相緩和やトリオンの自然放射だけを入れただけでは説明できず、位相の反転は自己形成量子ドットが持つ成長面内の光学異方性を有することにより、緩和時間の変化は新たに輻射減衰の緩和項を導入することで説明された。この事は、電子スピンのコヒーレント緩和にはスピン緩和だけでなく電子-トリオン間の光学的コヒーレント緩和も鋭く働くことを示している。電子スピンの初期化の機構は、電子-トリオン遷移に共鳴したピコ秒パルス光による電子-トリオンコヒーレント重ね合わせの生成である。

研究課題 04: シリコン量子ビット実現に向けた要素技術の開発と関連物理の解明

研究代表者/小寺 哲夫 (東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター・助教)

量子ドットの電子スピンを用いた量子計算の研究は、これまでGaAs系量子ドットを中心に進められてきた。しかし、核スピンによるデコヒーレンスの問題、エレクトロニクス技術との適合性を考慮すれば、将来的にはシリコン系量子ドットへの展開が必要と考えられる。この研究展開をより速やかに進めるためには、GaAs量子ドットの技術や物理的知見をシリコン量子ドットに適用し、上手く融合させることが肝要である。本研究では、まずシリコン量子ドット素子の設計・作製を行い、素子評価として電気伝導度測定により単一電子状態を検出する。さらに、高周波電圧操作を用いてスピンの操作や読み出しを行う計画である。

GaAs系量子ドットで実績のあるマイクロ磁石法により、シリコン量子ドット内の電子スピン操作を今後行っていくことを見据えて、それに適したシリコン量子ドット素子の開発を行った。これまではシリコン量子ドットの上部に形成されたトップゲートに正電圧を印加することで非ドーブのシリコン層にキャリアを誘起していたが、今回の構造はトップゲートを持たない。このためマイクロ磁石を量子ドット上部に集積しやすいという利点がある。本素子では、シリコン層にキャリアを誘起するため、バックゲートを用いる。

並列に静電結合した2つのシリコン量子ドットを用いて、サイドゲート電圧を掃引し、それぞれの量子ドットに流れる電流を測定した。その結果、クーロンピークとそれに重畳した複数のキंकが観測された。キंकは、片方の量子ドットの電子数が変化することにより静電相互作用が変化したことを反映している。本研究により、バックゲートを用いてキャリアを誘起したシリコン量子ドット素子の動作確認、及び、近傍に配置したシリコン量子ドット電荷検出計による電子数変化の読み出しに成功した。

研究課題 05: 量子コヒーレント状態の制御検出における非平衡量子統計熱力学の理論研究
研究代表者／内海 裕洋（三重大学工学部物理工学科・准教授）

現在まで超伝導量子素子や半導体量子ドットにおいて実現される、電荷・磁束・スピン量子ビットの量子コヒーレント状態を、制御・検出する研究がなされてきた。一方で近年、「揺らぎの定理」に代表されるメソスコピック系の統計・熱力学が発展しており、固体素子を用いても、単一電子における揺らぎの定理が検証されている。メソスコピック系の統計・熱力学は、系を外部から駆動して仕事をしたときの非平衡揺らぎの分布を用いて構築される。このような操作と測定は、ナノスコピック固体素子における量子コヒーレント状態の制御・検出の実験技術を使えば、量子系で実現できると期待される。本プロジェクトの大きな目標は量子系において揺らぎの定理を検証する方法を構築することである。

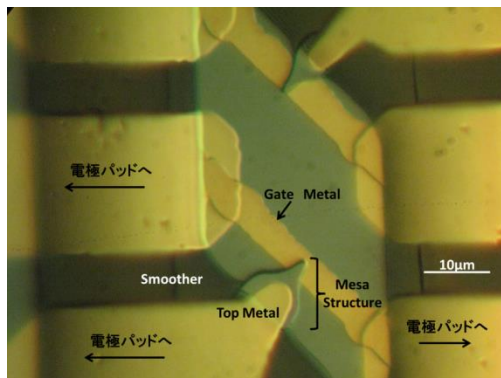
本プロジェクトは今年の 4 月からスタートした。現在までの予備的な研究では、古典回路と結合した量子導体について完全計数統計理論を構築している。そして量子導体を流れる電流の確率分布は、古典回路にする仕事の分布として原理的に測定可能であり、また揺らぎの定理も成り立つことを示している。このセットアップは量子導体を流れる電流分布の測定に当てはめることができ、射影測定を連続的に行う場合に相当すると考えられる。しかし、より高度な量子状態のコヒーレント制御・検出という一連の操作に拡張するためには、原理的な問題も含めて課題が多い。とくに、実際に時間依存した外場を加える場合に初めに問題となるのはヒーティングの効果など外部環境の効果であろう。今後は、環境の効果を実際に考えてゆく予定である。

研究課題 06: 長距離電子スピン状態転送を実現する荷電状態制御単一光子素子の研究
研究代表者／中岡 俊裕（上智大学理工学部・准教授）

量子情報通信や量子計算に代表される量子情報処理技術の今後の発展、特に、量子情報通信の長距離化（量子中継）や量子計算機とのインターフェイスに「(長距離)離れた 2 素子間の量子もつれ」の生成が極めて重要である。本研究では、サイドゲート制御型量子ドット単一光子素子を発展させ、半導体電子デバイスによる離れた 2 素子間（スピンスピン間）量子もつれ（EPR 状態配布）の実現に必要な技術開拓することを目指している。

素子はサイドゲートを持つ縦型単電子素子を基本構造とし、量子ドットを含む p-i-n 構造に同構造を適用することで高 fidelity 量子もつれ生成に適した状態への制御とその状態からの単一光子発生、それらの光子干渉を達成するためのゲート制御を行う。

まず、このような本研究のための新しい素子構造を設計、試作した(下図)。試作素子は予想よりもゲートのリーク電流が大きかったが、単一量子ドットからの発光を確認した。リークの要因をつきとめ、現在改良した素子の作製を続けている。



素子作製と並行し、2 光子干渉に耐えうる高効率な光取り出しのための、素子裏面からの新光子測定法開発をすすめている。室温での原理動作を確認した。現在低温での測定開発の準備を進めている。

研究課題 07: 光合成蛋白における生体分子スピン系の量子情報操作に向けた研究
 研究代表者/松岡 秀人 (東北大学多元物質科学研究所・助教)

近年、光合成に参加する分子が常温においてもエンタングルド状態を保持している可能性が示され、天然の光合成タンパクは量子情報科学分野において注目を集めつつある。光合成では、光化学系 I および光化学系 II と呼ばれる二つの反応中心が存在する。光化学系 I は反応中心と光捕集系の超複合体である。その反応中心には電子供与体 P_{700} と 5 つの電子受容体が電子移動成分として含まれる。電子受容体は、アクセサリクロロフィル (A_0)、フィロキノ (A_1)、そして 3 つの鉄硫黄錯体 ($4Fe-4S$) である。我々はこれまで、光合成のユビキタス中間体でエンタングルド状態にあるスピン相関ラジカル対の観測を高時間分解・高周波 EPR (Electron Paramagnetic Resonance) 法により行ってきた。とりわけ注目してきたのは、光化学系 I 電子移動反応において時間分解 EPR によって最初に検出可能なスピン相関ラジカル対 $P_{700}^+A_1^-$ である。光合成における量子スピン情報の操作を目指して、次の実験を行っている。まず、スピン相関ラジカル対を対象として、量子コヒーレンスの安定化と量子スピン状態の制御および観測である。具体的には、まず光合成タンパク内の化学的環境を人工的に制御し、量子コヒーレンスの安定化を目指す。また、電流検出型高時間分解高周波パルス EPR 法を確立し、スピン状態の制御ならびに観測を実現する。本研究により、生体分子スピン系を介した生体量子情報科学の開拓を行っていきたい。

研究課題 08: ダイヤモンド NV 中心における量子情報の電氣的制御に向けた研究
 研究代表者/水落 憲和 (大阪大学基礎工学研究科・准教授)

— ダイヤモンド半導体を用いた室温での電氣的単一光子発生 —

これまで半導体量子ドットにおいて単一光子源の研究がなされてきた。高効率な素子や量子もつれ光子源など優れた素子が作られてきたが、それらは低温での動作であった。今回我々は室温動作する単一光子源をダイヤモンドの NV 中心を用いることにより実現した[1]。これまで光励起型では室温動作の単一光子源の例は報告されていたが、電流注入型による室温での動作は初めてである。

構造を図1に示した。CVD法により、ボロンドープ、リンドープによりそれぞれ、p層、n層を作成している。p層、i層、n層の厚さはそれぞれ0.5 mm, 10 μ m and 0.5 μ m。Ti(30 nm)/Pt(100 nm)/Au(200 nm)の電極が両端に蒸着されている。単一のNV中心を観測するため、NV中心はi層に埋め込まれている。i層の作製には発光中心が極めて少ない($\ll 0.1$ ppb ($10^{13}/\text{cm}^3$))、非常に高品質なダイヤモンドが用いられている。単一NV中心からの発光であることは発光スペクトルとアンチバンチング測定から決定された。PLとELでは発光ダイナミクスが全く異なることが実験結果から示されたが、解析からELの際は第3の状態を経由して発行していることが示された。

今回の成果はNV中心における単一光子発生の電氣的な制御にとどまらず、スピンの電氣的操作や将来の量子デバイスの集積化につながる重要なステップになると考えられる。

[1] N. Mizuochi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, M. Nothaft, P. Neumann, A. Gali, F. Jelezko, J. Wrachtrup, S. Yamasaki, *Nature Photonics*, 6, 299–303 (2012)

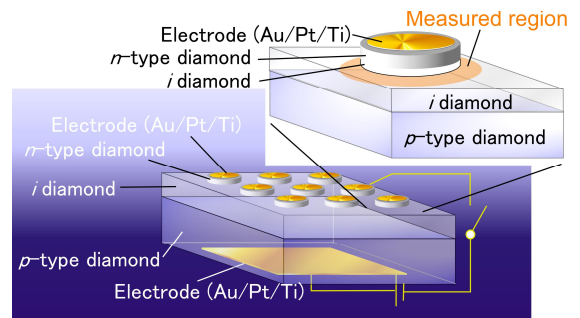


図1. 単一光子発生素子図 p層、i層、n層の厚さはそれぞれ0.5 mm, 10 μ m and 0.5 μ m。Ti(30 nm)/Pt(100 nm)/Au(200 nm)の電極が両端に蒸着されている。

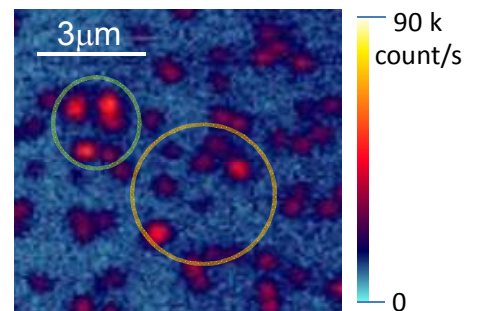


図2 ELの共焦点顕微鏡像。560 nmより長波長の光を室温において観測している。