

# NEWS LETTER

## Vol. 08

2012年11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	4
〈分子スピン系〉	研究代表者: 北川 勝浩 大阪大学	5
〈冷却原子系〉	研究代表者: 高橋 義朗 京都大学	6
〈イオントラップ系〉	研究代表者: 占部 伸二 大阪大学	6
〈光子量子回路系I〉	研究代表者: 竹内 繁樹 北海道大学	7
〈光子量子回路系II〉	研究代表者: 小芦 雅斗 東京大学	8

### 2012年度公募研究採択課題

〈Heterogeneous Quantum Repeater Hardware〉		9
	研究代表者: バンミーター ロドニー 慶應義塾大学	
〈トポロジー符号化された量子計算のためのコンパイラ〉		10
	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〉		11
	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〉		11
	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〉		12
	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〉		12
	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〉		13
	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〉		13
	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)

- 今号では、ナリフランコのグループの理論的な研究成果を報告します。

### Speed limits for quantum gates in multiqubit systems

We use analytical and numerical calculations [1] to obtain speed limits for various unitary quantum operations in multiqubit systems under typical experimental conditions. The operations that we consider include single-, two-, and three-qubit gates, as well as quantum-state transfer in a chain of qubits. We find in particular that simple methods for implementing two-qubit gates generally provide the fastest possible implementations of these gates. We also find that the three-qubit Toffoli gate time varies greatly depending on the type of interactions and the system's geometry, taking only slightly longer than a two-qubit controlled-not (cnot) gate for a triangle geometry. The speed limit for quantum-state transfer across a qubit chain is set by the maximum spin-wave speed in the chain.

[1] S. Ashhab, P.C. de Groot, F. Nori, Phys. Rev. A 85, 052327 (2012).

### Selective darkening of degenerate transitions for implementing quantum controlled-NOT gates

We present a theoretical analysis [2] of the selective darkening method for implementing quantum controlled-NOT (CNOT) gates. This method, which we have recently proposed and demonstrated, consists of driving two transversely coupled quantum bits (qubits) with a driving field that is resonant with one of the two qubits. For certain driving conditions, the evolution of the two-qubit state realizes a CNOT gate. The gate speed is found to be limited only by the coupling energy  $J$ , which is the fundamental speed limit for any entangling gate. We conclude that this method is competitive with existing schemes for creating entanglement, with the added advantages of being applicable for qubits operating at fixed frequencies (either by design or for the exploitation of coherence sweet-spots) and having the simplicity of microwave-only operation.

[2] P.C. de Groot, S. Ashhab, A. Lupascu, L. DiCarlo, F. Nori, C.J.P.M. Harmans, J.E. Mooij, New J. Phys. 14, 073038 (2012).

### Two-qubit gate operations in superconducting circuits with strong coupling and weak anharmonicity

We theoretically study the implementation of two-qubit gates in a system of two coupled superconducting qubits [3]. In particular, we analyze two-qubit gate operations under the condition that the coupling strength is comparable with or even larger than the anharmonicity of the qubits. By numerically solving the time-dependent Schrödinger equation under the assumption of negligible decoherence, we obtain the dependence of the two-qubit gate fidelity on the system parameters in the case of both direct and indirect qubit-qubit coupling. Our numerical results can be used to identify the 'safe' parameter regime for experimentally implementing two-qubit gates with high fidelity in these systems.

[3] X.-Y. Lu, S. Ashhab, W. Cui, R. Wu, F. Nori, New J. Phys. 14, 073041 (2012).

### Landau-Zener-Stückelberg interferometry of a single electron charge qubit

We perform Landau-Zener-Stückelberg interferometry [4] on a single electron GaAs charge qubit by repeatedly driving the system through an avoided crossing. We observe coherent destruction of tunneling, where periodic driving with specific amplitudes inhibits current flow. We probe the quantum dot occupation using a charge detector, observing oscillations in the qubit population resulting from the microwave driving. At a frequency of 9 GHz we observe excitation processes driven by the absorption of up to 17 photons. Simulations of the qubit occupancy are in good agreement with the experimental data.

[4] J Stehlik, Y. Dovzhenko, J.R. Petta, J.R. Johansson, F. Nori, H. Lu, A.C. Gossard, Phys. Rev. B 86, 121303 (2012).

## **Strong coupling of a spin qubit to a superconducting stripline cavity**

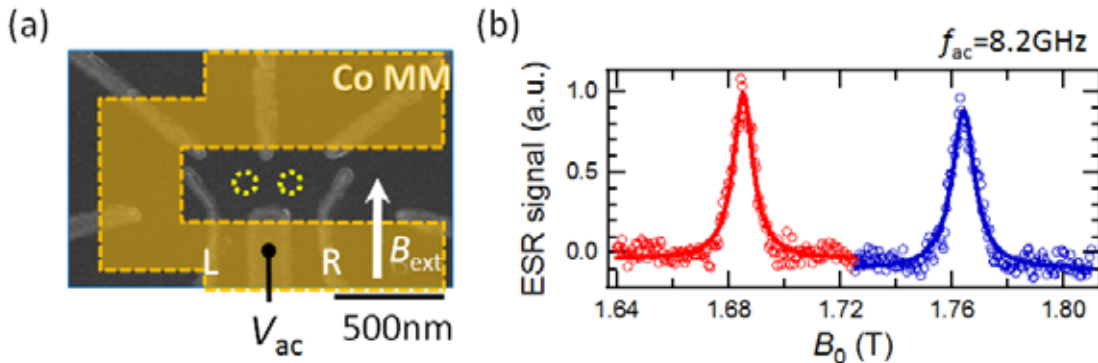
We study electron-spin-photon coupling in a single-spin double quantum dot embedded in a superconducting stripline cavity. With an external magnetic field, we show that either a spin-orbit interaction (for InAs) or an inhomogeneous magnetic field (for Si and GaAs) could produce a strong spin-photon coupling, with a coupling strength of the order of 1 MHz. With an isotopically purified Si double dot, which has a very long spin coherence time for the electron, it is possible to reach the strong-coupling limit between the spin and the cavity photon, as in cavity quantum electrodynamics. The coupling strength and relaxation rates are calculated based on parameters of existing devices, making this proposal experimentally feasible.

[5] X. Hu, Y.X. Liu, F. Nori, Phys. Rev. B **86**, 035314 (2012).

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)

- 不均一磁場の電極制御と高速ラビ回転

量子ドット中の電子スピン操作を高速化することを目指し、スピンの電氣的制御に用いる微小磁石の磁場性能を向上させた。浅い2DEGと厚い磁石を用いて作製した二重量子ドットデバイスにおいて電子スピン共鳴実験を行い、従来報告値の5倍程度となる80 - 100mTのドット間磁場差を観測した。また、磁場分布の空間依存性とドット位置の電極電圧制御を組み合わせることで、スピンの感じる静的磁場を10mTにわたって電氣的に制御可能であることが分かった。さらに印加高周波電圧の掃引によるラビ振動の測定から、75MHzと従来に比べ1桁近く高速なスピン回転が可能であることが分かった。



図(a)作製した二重量子ドットの SEM 像。コバルト微小磁石の形状が橙色で示してある。(b)電子スピン共鳴信号。各ドット中の電子に対応する2つの共鳴線が観測されている。

- 電流ポンプ動的核スピン偏極のダイナミクス

GaAs 等の半導体材料ではすべての原子核がスピン 3/2 を持つため、電子スピン量子ビットの重要なデコヒーレンス要因となっている。核スピンのゼーマンエネルギーが非常に小さいため希釈冷凍機温度でも「高温」状態であり、統計的な揺らぎが無視できない。最近電子スピンによる動的核スピンポンプにより核スピンの実効温度を下げる可能性が指摘されている。そこで、二重量子ドット中の電子スピンと核スピンのダイナミクスを理論的に調べた。特に電子スピンのダイナミクスが核スピンのそれに比べて充分高速であるため、電子スピンに対して「断熱近似」が適用できる事が重要である。その結果、二つの量子ドットに加えたバイアスの正負により、二量子ドットの核スピン偏極の偏りに大きな違いが現れる事が分かった。

## <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)

量子ビット系と環境系の相互作用を抑制する動的デカップリングには NMR 分光で古くから用いられている多重パルス系列が有効で、分子スピン量子ビット系以外に NV センターのような不純物量子ビット系や超伝導量子ビット系でも用いられている。また、最適制御理論に基づき数値最適化された変調パルスもよく用いられる。共振器を用いる場合は、これらの多重パルス系列や数値最適化変調パルスの性能が共振器の過渡現象歪みによって大きく劣化してしまうことを数値シミュレーションによって示し、以前私たちが開発した共振器歪みを補償する技術 [1] を用いることでより高い忠実度で動的デカップリングが実現できることも示した。

実験系の制約で有限の強度と周波数帯域のパルス照射しかできない場合やパルスパラメータに系統誤差がある場合等は、数値最適化アプローチの方がデルタ関数パルスを仮定して設計されている多重パルス系列に比べてより最適な解を見つけることができる。ただし、数値最適化変調パルスの設計には量子ビット系の詳細な情報が必要となり、系の大きさにしたがって指数関数的に難しくなる。一方、多重パルス系列は系の詳細情報を必要としないうえに系の大きさに依存せずに系統的に設計できる。私たちはこれらの二つの設計アプローチの弱点を克服し、利点を生かすことのできる統合的な動的デカップリング系列設計法を開発した [2]。動的デカップリング波形の生成を非線形計画問題に帰着させ、系の対称性を利要するためにそのコスト関数をリー代数上に構成することで系の詳細情報が不要にできる。

[1] Y. Tabuchi, M. Negoro, K. Takeda, M. Kitagawa, "Total compensation of pulse transients inside a resonator", *Journal of Magnetic Resonance*, **204**, 327 (2010).

[2] Y. Tabuchi, M. Kitagawa, "Design method of dynamical decoupling sequences integrated with optimal control theory", arXiv:1208.5218.

## <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ボース・アインシュタイン凝縮体の2次元モット絶縁体状態に対して、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2重光モラセスを構成してそれからの発光を観測し、5秒程度の長い寿命を確認するとともに、光誘起衝突やモラセス光の干渉効果を確認した。

一方、これまで光格子の量子シミュレーション実験は、スタンダードな立方格子について行ってきたが、その可能性を広げるべく、二つの波長を用いた光超格子の開発に取り組み、2次元光超格子を実装することに成功し、ボース・アインシュタイン凝縮体の干渉の振る舞いから、確認した。今後計画しているリープ格子の生成も、準備が着々と進み、干渉計による光路安定化にも成功した。

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に向けて、これまで磁器光学トラップのみを用いていた装置の大幅な改良を行い、超高真空下において長寿命の光トラップを行うことのできる新しいチャンパーを組み上げ、磁気光学トラップまで確認した。

### 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)

4 イオンのディッケ状態の生成に成功した。光子の系では最大で6粒子のディッケ状態の生成が報告されているが、原子系では励起数2以上のディッケ状態の生成はこれまで報告されていなかった。ディッケ状態はGHZ状態とともに多粒子エンタングル状態の代表的なものであり、精密周波数測定への応用も期待されている。今回我々が提案し実演した方法は、イオンのレッドサイドバンドおよびブルーサイドバンドにわずかに離調した二色光を用い、それらの二色光の強度を独立に変調することにより、多準位 STIRAP(誘導ラマン断熱通過)の原理を用いてディッケ状態を生成するというオリジナルな手法である。この操作はユニタリーなスピンスクイーミング操作に対応することを示すことができ、これにより最大スピンスクイーズド状態の一つであるディッケ状態が生成される。この方法は個々のイオンへの個別アクセスを必要とせず、また強度変調の詳細によらないというロバスト性も備える。実際に実験で生成された4イオンのディッケ状態のフィデリティは0.84以上であった。

## <研究項目D：光系量子サイバネティクス>

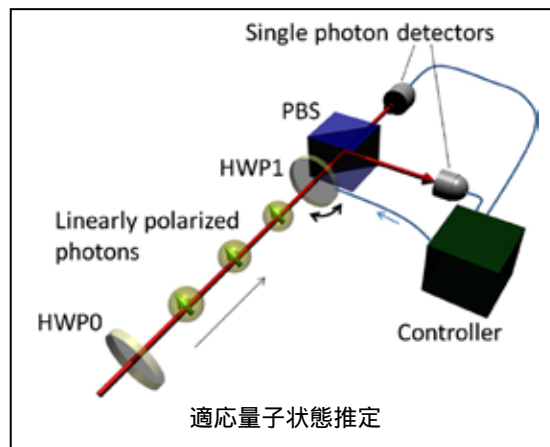
計画研究 D01：光子量子回路による量子サイバネティクスの実現  
研究代表者 / 竹内 繁樹 (北海道大学電子科学研究所・教授)

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。

電子や光子は、古典力学的な粒子とは異なり、異なる状態の「重ね合わせ」状態をとります。状態を1回測定すると、それら異なる状態の何れかとして検出されるため、1回の実験では、どのような「重ね合わせ状態」にあるかを知ることができません。そのため、できるだけ少ない回数の測定によって、正確に量子状態を推定することは、量子情報技術はもちろん、微弱光計測などにおいても非常に重要です。この問題に対して、量子1つ1つの計測結果に応じて毎回「測定方法」を最適化する、適応的(アダプティブ)な推定の理論が電機通信大学の長岡浩司教授らによって提案され、本新学術領域公募研究代表者である大阪大学の藤原彰夫教授らによって、その最適性(強一緻性、漸近有効性)が証明されていました。

今回、藤原グループと共同で、この「適応量子状態推定」の実証に、光子を用いて初めて成功しました。実験では、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源から射出された光子を、ある特定の直線偏光状態に準備し、その偏光角度の推定を行いました。光子 300 個に対する測定を 500 回繰り返し行い、その実験データを解析した結果、適応量子状態推定の最適性(強一緻性、漸近有効性)を厳密に確認しました。この適応量子状態推定は、従来法の量子状態トモグラフィよりも効率的な状態推定が可能となっており、今後、量子情報処理・通信や量子メトロロジーといった広い領域にわたって役立つことが期待されます。

[1] R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai, A. Fujiwara, and S. Takeuchi, Physical Review Letters 109, 130404 (2012).



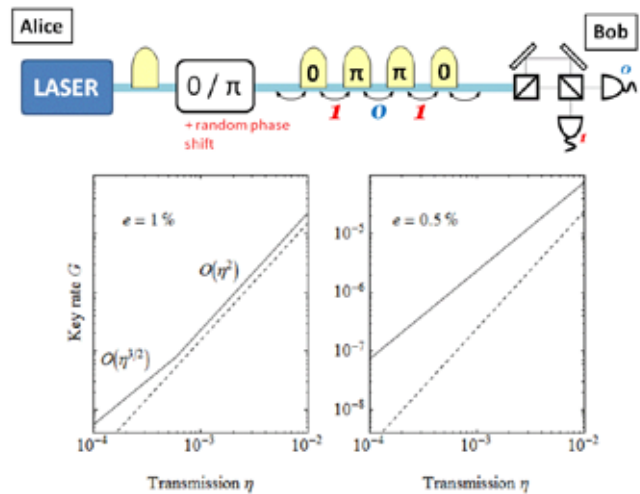


## 計画研究 D02: 光を基軸とした多キュービット量子制御

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)

### - パルス列の位相を用いた量子暗号のセキュリティ証明に成功

差動位相シフト(DPS)方式は、微弱レーザーパルス列の隣り合うパルス間の光学的位相差にビット情報を載せる量子鍵配送方式である。レーザーが光子を放出する過程はランダムであるため、どうしても同時に2個以上の光子を放出してしまうケースが生じ、その場合には余分な光子を盗聴に利用されるおそれがある。この問題を防いでセキュリティを確保するには、一般にはレーザーの光強度を下げていけばよいが、そうすると最終鍵のレートの通信路透過率依存性が悪化してしまう。この点で、DPS方式は、非常にシンプルな方式でありながら、そのような余分な光子に対する攻撃に耐性を持つと信じられている。しかし、パルス毎に個別にセキュリティを議論できないなどの事情から、セキュリティの証明が難しく、この特長は予想の域にとどまっていた。今回我々は、DPS方式が確かに複数光子への攻撃に対して耐性を持つことを示すセキュリティ証明を与えることに成功した。耐性がない場合には、最終鍵のレートは通信路透過率 $\eta$ に対し $O(\eta^2)$ の依存性を示すが、今回の証明ではそれより高い $O(\eta^{1.5})$ の依存性で最終鍵を取り出すことができる。



<2012年度公募研究採択課題>

研究課題 01: **Heterogeneous Quantum Repeater Hardware**

研究代表者 / パンミーター ロドニー (慶應義塾大学・環境情報学部・准教授)

- **AQUA: Advancing Quantum Architecture**

Our mission is to bridge the gap between theoretical algorithms and real-world experiments to accelerate the deployment of useful quantum information technology. Much of our work is directed at designing distributed quantum computing systems, a paradigm we expect to be critical to scalability and usability of quantum systems.

We work in six main areas, including: design of large-scale devices (in conjunction with Stanford University and others); principles of quantum computer architecture; software tools for programming quantum computers and visualizing their behavior; workload analysis, determining how to efficiently implement known quantum algorithms on prospective quantum architectures; and repeater networks, to tie them all together. The sixth main area, management of errors in quantum systems, drives all of the other areas.

Recent results include development of a layered approach to quantum computer architecture (Jones et al., Phys. Rev. X 2012), and an analysis of large-scale quantum repeater networks (Van Meter, IEEE Network 2012). Lattice surgery for surface code quantum computation (Horsman et al., New J. Phys., to appear) provides a new, resource-efficient mechanism for fault-tolerant operation, and is expected to impact near-term experimental work.

For the Quantum Cybernetics project, we are extending our work on repeater networks to heterogeneous hardware, simulating three types of physical qubits in the same repeater node.

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)

- **Quantum Blocks: A crowd-sourcing solution to programming a topological quantum computer**

In 2005 a group of computer scientists at the University of Washington undertook a unique project to solve a necessary scientific problem through the general public; they created a video game. FoldIt (foldit.it) was designed to allow members of the general public to determine the unique way in which a long chain of amino-acids (the building blocks of proteins) fold up into a 3-dimensional shape. This problem, which is extremely difficult to calculate automatically, ultimately determines the function of proteins in the human body and consequently is of great interest to biologists and drug manufacturers. This game was a great success, generating solutions that had baffled scientists for years with a registered user base (as of 2011) of over 250,000 members of the public.

Inspired by this work, we have begun a similar project, "Quantum Blocks". Quantum Blocks is a game targeted at members of the public, designed to optimise the circuits needed to implement fault-tolerant quantum information processing in the topological cluster state model. The game will be released on all major platforms and on Android and iOS devices. The current version of Quantum Blocks is currently an Alpha version and will be distributed to members of the physics community later this year. A full public release is expected in the winter of 2013 and will hopefully find better solutions to circuit optimisation in the topological model.

### 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)

#### - 半導体中の電子スピンの長時間コヒーレンス

半導体中の電子スピンの横緩和時間( $T_2$ )は核スピンとの超微細相互作用を通して働く核磁場の揺らぎに律速されており、 $s$  族では構成原子の原子番号が奇数で自然存在比が大きい核は半整数の核スピンを持つため量子ドットでも数nsに上限がある。構成原子の原子番号が偶数の  $II-VI$  族半導体では、核スピンの緩和時間が期待される。ZnOは  $II-VI$  族半導体の中でも核スピンを持つ自然存在比が少なく、電子スピンの緩和時間が長くなるのが期待される。時間分解カー回転 (TRKR) 測定法を用いて、ZnO薄膜中のGaドナー(ドーパ濃度:  $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )により与えられた電子スピンの緩和時間とその温度依存性を測定した。束縛励起子D<sup>0</sup>Xの共鳴励起下でTRKRはモード同期レーザーの繰り返し時間12.2nsに匹敵する緩和時間を反映してポンプ前に一つ前までのポンプ光で繰り返し誘起されたカー回転が積算されて観測されるため、プローブ光をポンプ光に対し負の遅延時間(-250ps)に固定し、横磁場をゼロ磁場付近で掃引しカー回転を計測する共鳴スピン増幅の手法を用いると $T_2^* = 12 \text{ns}$ の緩和時間が温度 $T = 1.8 \text{K}$ で得られた。温度上昇とともにTRKRの減衰は2成分からなり、遅い成分が生き残る。低温でも見られる長い電子スピン緩和は核スピンの揺らぎに依ると考えられるが、プローブ光をポンプ光に対し負の遅延時間(-250ps)に固定し、縦磁場をゼロ磁場付近で掃引してカー回転を計測すると、カー回転はゼロ磁場において減少する。観測されたディップの半値半幅は核スピン磁場の揺らぎの大きさを示し、これが1.3mTと求まる。これからZnOにおける核磁場の揺らぎによる電子スピンの緩和時間は14nsと見積られ、12ns程度という遅い緩和時間と概ね一致する。

### 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)

量子ドット中の電子スピンを用いた量子計算の研究は、GaAs系量子ドットを中心に盛んに進められてきた。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。

今回、単電子トランジスタ電荷検出計を近傍に配置したシリコン2重量子ドットを作製し、評価を行った。2つのサイドゲートを掃引しながらソースドレイン電流を測定することにより、2重量子ドットに特有のハニカム状の電荷安定状態図を得ることができた。さらに単電子トランジスタ電荷検出計を用いて2重量子ドット内の電子数変化を読みだすことに成功した。その際、単電子トランジスタ電荷検出計のソース電極・ドレイン電極に負電圧を印加することにより、2重量子ドットのポテンシャルを制御するゲート電極として単電子トランジスタを機能させる動作実証も行った。これは、単電子トランジスタに対して電荷検出機能とゲーティング機能の2つの役割を持たせることを意味しており、シリコン量子ビットの集積化に有用な技術を開発した。

**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)

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」や Jarzynski 等式に代表されるメソスコピック系の統計力学、熱力学が発展しており、固体素子を用いて、単一電子における揺らぎの定理が検証されるようになった。メソスコピック系の統計力学、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、量子系でも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理論的に提案することである。

現在までの予備的な研究を続けている。量子系において揺らぎの定理を検証するうえで、仕事をいかに測定するか、という問題がある。前回は量子導体を流れる電流分布の測定を念頭に、射影測定を連続的に行う場合の理論を構築した。そして、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、ヒーティングの効果など外部環境の効果が重要となると考えた。その方針に基づき、今回は外部環境についての知見を得るため、電子・フォノン相互作用の働く量子導体の完全計数統計をしらべ、キュムラント生成関数のもつ解析的な性質を分析した。今後も、引き続き環境効果を考えつつ、揺らぎの定理を検証するためのセットアップを考察する予定である。

**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)

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)量子もつれの実現に必要な技術開拓することを目指している。

図1の左図が前回のニュースレターで報告した本研究のための新しい素子構造である。現在、素子作製と並行し、2光子干渉に耐える高効率な光取り出しのための、新光子測定法開発をすすめている。本測定方法のポイントはゲート電極で覆われた本素子に対して基板側からの測定であり、このために従来のランプ照明による測定に変わり、サンプルを透過するレーザーの反射光を用いた素子像取得が必要になる。図1右図がその結果であり、顕微鏡像に対応する素子イメージを得ることができた。今後、本測定手法の最適化により、光子干渉測定をすすめる。

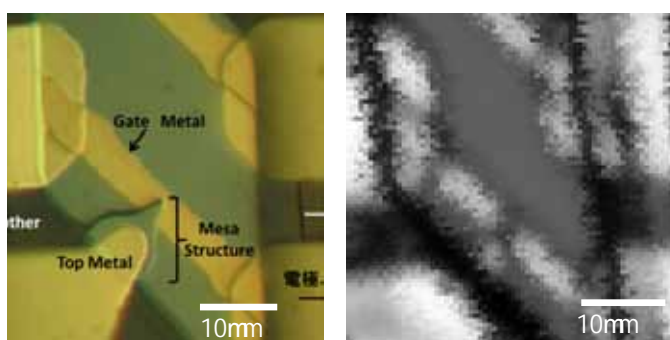


図1: 素子の光学顕微鏡写真(左)と開発した反射光測定によるイメージ図(右)

**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。高周波 EPR 法はエンタングルド状態にある電子スピンの検出に最も有用な実験手法の一つである。我々はこれまで、Bruker 社製の高周波 EPR 装置 (E600) に広帯域低ノイズ増幅器 (NF SA-230F5; 帯域: 500 Hz to 140 MHz) を導入することによって、EPR 法では世界で最も高い時間分解能 5ns を実現した。また、Bruker 社製 E600 分光器に自作のパルス制御システムと、高出力 (280mW) マイクロ波パルス増幅器を備えたマイクロ波ブリッジを導入することにより、高時間分解高周波パルス EPR 測定も実現した。新たに構築したそれら EPR 装置を用いて、光合成のコピ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行ってきた。レーザー照射 10ns 秒後に、光合成タンパク中のスピン相関ラジカル対 ( $P_{700}^+A_1^-$ ) から由来する速い振動、いわゆる量子ビートを観測した。光合成における量子スピン情報の操作を目指して、さらなる時間分解能の向上を図っている。我々はまた、高時間分解高周波 EPR 法を用いた電流検出型高時間分解高周波パルス EPR 装置の構築を行っており、生体分子スピン系の量子情報を検出および操作するため、今後応用を図っていく予定である。

**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 )

ダイヤモンド中の単一窒素 空孔複合体 (NV) 中心は優れたスピン特性及び光学特性を有し、近年注目されている。特筆すべき点として、固体中のスピンにも関わらず気相中の原子/イオンや液相中の分子等の微視的系に匹敵する優れたスピンコヒーレンス特性を持ち、光により検出・操作することが可能な点が挙げられる。これまで我々はいち早く NV 中心に着目し、核スピンによる多量子ビット化とその系における室温での量子もつれ生成の実証といった量子情報処理の実証研究を行っていた。更に我々はこの優れた系を発展させるため、固体系であるという特徴を生かし、単一 NV 中心が量子インターフェースとしての役割を担えないかと考え研究を始めていた。今年の 4 月には、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成功について発表した。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。最近では、電氣的に単一 NV 中心の電荷状態の制御に成功している。電氣的なスピン状態の制御にもつながる結果と考えており、研究を継続している。