

半導体ナノ構造による量子情報インターフェースの研究 (051403015)

Quantum information interface in semiconductor nanostructures

研究代表者

藤澤利正 東京工業大学

Toshimasa Fujisawa, Tokyo Institute of Technology

研究分担者

太田剛[†] 佐々木智[†] 林稔晶[†] 江藤幹雄^{††} 植田暁子^{††}

Takeshi Ota[†] Satoshi Sasaki[†] Toshiaki Hayashi[†] Mikio Eto^{††} Akiko Ueda^{††}

[†]NTT 物性科学基礎研究所 ^{††}慶應義塾大学

[†]NTT Basic Research Laboratories ^{††}Keio University

研究期間 平成 17 年度～平成 21 年度

概要

機能的で高度な量子情報処理・量子通信には、さまざまな特徴をもつ量子情報媒体（量子ビット）を結ぶ量子インターフェースの開発が重要である。本研究では、半導体ナノ構造における様々な量子状態（電荷、電子スピン、核スピンなど）に着目し、異種または同種の量子状態間の相互作用を正しく理解するとともに、コヒーレントな状態制御や量子状態測定技術を研究開発した。特に、スピン軌道相互作用の選択則を用いた電子スピンエンタングルメントの生成・検出方法の提案、電荷二量子ビットの高次のトンネル過程を用いた多機能二量子ビット操作の実現、超微細相互作用による電子スピンと核スピンの相関状態の理論などの成果を得た。

Abstract

Quantum interface between various quantum bits is essential for developing functional quantum information processing and quantum communications. In this project, we focused on various kinds of quantum states (charge, electron spin, nuclear spin, etc.) in semiconductor nanostructures. We have reached further understanding of interactions between quantum states, and developed coherent control of quantum states and measurement schemes. We obtained some particular results such as generation and detection scheme of entangled electron spins, realization of multiple two-qubit operations by means of higher-order tunneling processes, and so on

1. まえがき

効率的な量子並列処理を可能にする量子コンピュータや、量子情報の複製が不可能であることを利用した量子暗号など、量子力学的な重ね合わせ状態を利用した量子情報技術の研究が注目されている。将来的には、これらを複合した量子通信ネットワーク技術への展開や、量子非破壊測定などの高感度量子測定などに幅広い応用が見込まれる。代表的な量子情報処理システムである量子コンピュータでは、ある程度集積化された量子ビットを用いて、量子情報の初期化・操作・保存・読み出しの一連の動作を、適した量子情報媒体（量子ビット）を用いて高精度に制御する必要がある。現在、核スピン、原子の内部状態、超伝導電荷状態、磁束量子、固体中の核スピン・電子スピン・励起子など、様々な粒子、材料系において基礎的な研究が続けられている。しかし、一種類の量子情報媒体（量子ビット）でこれらを十分に満足する物理系は実現されていない。特に、長いコヒーレント時間を有することと人為的な制御・観測が可能であることは、常にトレードオフの関係にあるため、十分な条件を満たすことが困難である。

我々は、複数の種類の量子情報媒体（量子ビット）を適材適所に用いることにより、より優れた量子情報処理システムを構築することができると考えている。量子ビット間の量子情報の交換（ここでは、量子情報インターフェースと呼ぶ）を実現することにより、必ずしも個々の量子ビットを独立に初期化・制御・観測・伝送する必要がなくなるなど、従来問題となっていた課題を解決できる可能性があ

る。本プロジェクトにおいては、半導体ナノ構造を用いることにより、このような量子インターフェースに関する研究を行うことを提案し、関連する研究を行ってきた。半導体ナノ加工技術を用いて量子ドット、量子細線、量子ポイントコンタクトなどの自由度の高いデバイス設計が可能であることや、電荷状態、電子スピン、核スピンなどの間の基本的な相互作用に関する物性がよく研究されていることから、量子インターフェースを研究する物理系として適していると考えられる。

2. 研究内容及び成果

本研究では、半導体量子デバイス中の電荷状態と電子スピン状態の相互作用に関しては実験研究を中心に研究を進め、電子スピンと核スピンの相互作用に関しては理論研究を中心として、量子情報インターフェースに関する研究を行った。ここでは、主要な2つの成果について述べる。
・**電荷二量子ビットによる多機能量子演算**：2つの量子ドットによって構成される半導体電荷量子ビットは、ゲート電圧によって量子ビットのパラメータを自在に制御できることから、制御性に優れた入出力部分の量子ビットとして適していると考えている。我々は、2つの電荷量子ビットの間のクーロン相互作用の大きさを共鳴電流により調べ、その結果を基に二量子ビット間のコヒーレント制御に成功し、複数の機能的な二量子ビット操作を実現できることを示した[Phys.Rev.Lett.2009]。

図1(a)は半導体微細加工により形成した4重量子ドッ

トの電子顕微鏡写真であり、上側の二重量子ドットを第一量子ビット、下側の二重量子ドットを第二量子ビットとして用いる。上側量子ビットのドレイン電極に高速電圧パルスを印加することにより、複数の量子演算を実現することができることを示した。図1(b)は、2つの量子ビットのトンネル結合が等しい条件の下で、各量子ビットのエネルギー差(横軸 ϵ_1 および縦軸 ϵ_2)をパラメータとして、どのような二量子ビット操作が可能になるかを示している。例えば、垂直・水平の線上では、制御回転(CROT)演算、すなわち一方の量子状態に依存して他方の量子状態に回転操作を行うことができる。右上方向に走る斜線上では、交換(SWAP)演算、すなわち2つの量子ビットの量子状態を交換することができる。さらに、右下にはしる斜線上では、FLIP演算、すなわち2量子ビット系の全分極を反転するものである。さらに、SWAPとFLIPが同時におこるBEL演算や、2つのCROT演算が同時におこるTRIPLE演算などの機能的な二量子ビット操作を、それぞれ1ステップで実現できることを示した。

従来、制御反転操作(CNOT)や交換操作(SWAP)などの二量子ビット操作は1種類だけ実現できれば十分であると考えられてきた。しかし、1種類の二量子ビット操作と一量子ビット操作の組み合わせによって様々な量子操作を実現することは必ずしも易しくない。物理系によって限られたコヒーレント時間や実験的な制約の中で効率的な量子操作を実現することが重要である。本研究の成果である多機能二量子ビット演算を用いることにより、量子もつれ状態など特徴的な量子状態をより簡便に実現することができることを期待される。

この知見は、様々な物理系に応用することができ、異種量子ビット間の量子情報インターフェースにも応用可能である。量子情報インターフェースでは、量子情報の交換できることが重要であり、交換演算が可能であることを示した意義は大きく、本課題で得た重要な知見の1つである。

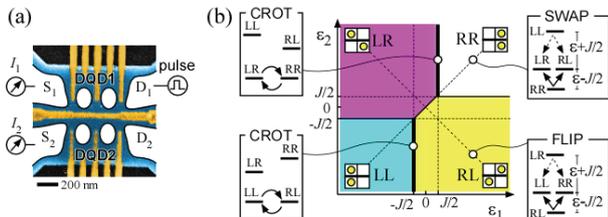


図1 (a)電荷量子ビットによる二量子ビット素子の電子顕微鏡写真。(b)電荷量子ビットの機能的な二量子ビット動作の条件。

・**単一電子電流計**：高度な量子情報技術は、量子コンピュータだけでなく様々な応用技術を派生的にもたらす可能性がある。本研究では、量子ドットの電荷測定技術を活用して、1個1個の電子の流れを計数することのできる単一電子電流計を実現した。微弱な光の状態を計測するためにフォトンカウンティングがよく用いられるように、電子のカウンティングは電子輸送における重要なキーデバイスになると考えられる。特に、本研究では、二重量子ドットの電荷測定により、電流電子を双方向に計数する技術を開発し、二重量子ドットを流れる電子に相関(アンチパンチング)が生じていることを確認するとともに、一電子レベルの微弱電流を測定できる電流計として機能することを実験的に示した[Science 2006]。

図2(a)のように、二重量子ドット(LおよびR)の電荷状態を近接したポイント接合(PC)によって検出することができる。図2(b)は測定例を示しており、二重量子

ドットの電荷状態(L,Rおよび0)に依存して、電荷計の電流が変化する様子を示しており、電流値の「とび」は電子1個の移動(トンネル現象)を表している。このような高感度電荷計測から、電子1個が「いつ」「どちらの方向に」流れたかを検出することのできる究極的な電流計として機能することを示した。数アトアンペア($\sim 10^{-18}$ A)という低レベルの雑音特性で電流測定が可能であることから、ナノエレクトロニクス研究に利用可能な技術である。

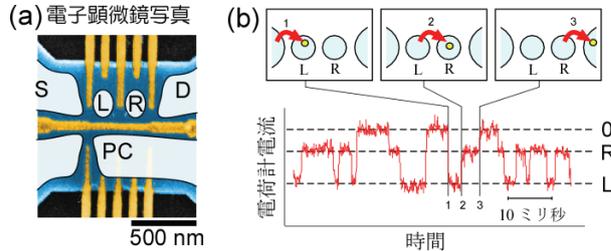


図2 (a)単一電子電流計の電子顕微鏡写真。(b)電荷状態(0,L,R)の時間変化の測定例。

3. むすび

半導体ナノ構造による量子情報インターフェースの研究により、量子状態の制御・観測に関する様々な知見を得た。より高度な量子情報技術の発展により、半導体量子コンピュータや、単一電子を用いた応用研究などへの発展が期待される。

【誌上发表リスト】

- [1] S. Sasaki, T. Fujisawa, T. Hayashi, and Y. Hirayama, "Electrical pump-and-probe study of spin singlet-triplet relaxation in a quantum dot", Phys. Rev. Lett. 95, 056803 (2005).
- [2] T. Fujisawa, R. Tomita, T. Hayashi, and Y. Hirayama, "Bidirectional counting of single electrons", Science 312, 1634 (2006).
- [3] G. Shinkai, T. Hayashi, T. Ota, and T. Fujisawa, "Correlated coherent oscillations in coupled semiconductor charge qubits", Phys. Rev. Lett. 103, 056802 (2009).

【申請特許リスト】

- [1]藤澤利正, 佐々木智, 都倉康弘, 「電子スピン対の量子エンタングルメントの生成と検出の方法」、日本、平成17年5月出願
- [2]藤澤利正, 「双方向単一電子計数素子」、日本、平成18年5月8日出願
- [3]太田剛, 藤澤利正, 「単電子素子インピーダンス測定装置および単電子素子インピーダンス測定方法」、日本、平成21年2月3日出願

【報道発表リスト】

- [1] “スピンのそろった電流を作る新方法考案、慶応大、半導体の微細構造利用 スピン注入が容易に”、科学新聞(科学新聞社発行)、平成17年7月22日
- [2] “電子一個の動きを捉えることに成功、単電子電流計を実現 一新型の超高感度電流計、ナノエレクトロニクスに応用”、朝日新聞・日本経済新聞・日刊工業新聞、平成18年5月16日
- [3] “多機能な二量子ビット演算素子の開発に成功 ～「制御反転演算」「交換演算」を1つの素子で実現～”、日刊工業新聞・日経産業新聞、平成21年7月27日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/SCOPE/>