

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22810008

研究課題名（和文） 多重シングルリード量子ドットを用いた
多数系の量子コヒーレンスの研究研究課題名（英文） Study of quantum coherence in multiple system
utilizing multi single-lead quantum dots

研究代表者

大塚 朋廣 (OTSUKA TOMOHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・研究員

研究者番号：50588019

研究成果の概要（和文）：半導体微細構造を用いた多数量子系に関する実験研究を行った。具体的には、多数量子系の主要素となる量子ホールエッジ状態について量子ポイントコンタクトを用いてエネルギー緩和を測定し、その緩和機構を明らかにした。またスピンを利用した多数量子系を形成する際に重要となる半導体微細構造中での局所スピン偏極について、シングルリード量子ドットを用いて低磁場で低擾乱に測定できる手法を開発し、その動作を確認した。さらにこの手法を用いて、量子ホールエッジ状態における局所スピン偏極の解明を行った。

研究成果の概要（英文）：We have demonstrated experiments relating multiple quantum systems utilizing semiconductor nano structures. We measured relaxation in quantum Hall edge states, which are important components of multiple quantum systems, with quantum point contacts and discussed about the relaxation mechanisms. We also developed a new method to detect local spin polarization in semiconductor nano structures, which is essential in spin related quantum systems, by using single-lead quantum dots and confirmed its operation. With this new method, we probed local spin polarization formed in quantum Hall edge states.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,050,000	315,000	1,365,000
2011 年度	1,050,000	315,000	1,365,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：ナノ構造科学

キーワード：量子ドット、量子細線、量子ホール効果、メゾスコピック系、スピン偏極、マイクロ・ナノデバイス

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体微細加工技術の進歩によって人工量子系を作製することが可能となり、さらにこれを用いて量子情報処理を実現しよ

うとする試みが行われるようになってきた。この中で単一の量子系だけではなく、多数系における量子コヒーレンスを理解することが重要となっている。

これまで我々は量子ドットが単一トンネル接合でリードと結合したシングルリード量子ドットの研究を行ってきた。この系は集積化しても良く定義された量子状態を容易に実現できるという特色を持っており、多数系の量子コヒーレンスを研究するのに適した系と考えられた。

2. 研究の目的

シングルリード量子ドット構造を用いた多数量子系を作製し、多数系における量子コヒーレンスを調べる。

特にシングルリード量子ドット構造は量子細線や量子ホールエッジ状態との結合性が良く、これらの複合系の特性を調べて多数系を構成する。そして多数系における量子干渉効果、スピン相関等を調べ、多量子ビット操作へと発展させる。

3. 研究の方法

電子線リソグラフィ等の半導体微細加工技術を用いて、シングルリード量子ドット構造等の数百 nm スケールの半導体微細構造を形成し測定試料を作製する。

そして試料を希釈冷凍機等を用いて極低温に冷却し量子効果を発現させ、電気伝導度測定を行うことにより新規系の量子現象を解明する。

4. 研究成果

(1) 量子ポイントコンタクトを用いた量子ホールエッジ状態におけるエネルギー緩和の測定

量子ホールエッジ状態は長いコヒーレンス長、良く定まったカイラリティ等の特色を持ち、量子ドット等の単一量子系をコヒーレントに結合させる有力な候補の一つである。このため、その性質の理解は多数量子系を形成する際に重要となる。本研究ではまずエッジ状態におけるエネルギー緩和機構を調べるために多数の量子ポイントコンタクトをエッジ状態に結合させた試料の測定を行った。

量子ポイントコンタクトを用いて非平衡なエネルギー分布をエッジ状態内に作り出し、伝播距離によるエネルギー分布の変化を測定する。この測定によりエネルギー緩和長を調べた。この結果、エッジ状態間で電子の移動を伴う場合の緩和長は $30 \mu\text{m}$ 以上、エネルギーの移動のみを伴う場合の緩和長は $3 \mu\text{m}$ 程度 (図 1(a)) であることを確認した。そしてエネルギー緩和が局所的に生じるホットスポットについても緩和長の測定を行い、緩和長が $2 \mu\text{m}$ 程度 (図 1(b)) であることより、その緩和機構が主にエッジ状態間のエネルギーのみの移動による緩和であることを

明らかにした。

これらの結果は、量子ドットを使って近年報告された実験結果 (H. le Sueur et al. PRL 2010) を、量子ポイントコンタクトという別の系を用いて再現し確認したものとなっている。さらにホットスポットにおけるミクロな緩和機構の解明は我々の知る限り本研究が初めてである。これらの知見は量子ホールエッジ状態を使って多数量子系を構成し、量子情報処理等への応用を行う際に重要となる。

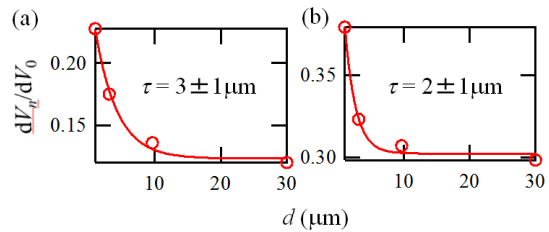


図 1 (a)エッジ状態間でエネルギーのみの移動がある場合の緩和 (b)ホットスポットにおける緩和

(2) シングルリード量子ドットを用いた低磁場でのスピン偏極検出手法の確立

固体中の電子スピンは量子情報処理、スピントロニクス観点から近年注目されている。半導体微細構造を用いれば、スピン軌道相互作用等の利用により、外部磁場を使わずスピン偏極を生成、操作できることが提案されており、この実現、検証は重要な課題の一つとなっている。このスピン偏極生成動作を正しく評価し、動作効率の向上等を行うには半導体微細構造中の局所的なスピン偏極状態を低擾乱で測定できるプローブが必要となる。このような局所スピンプローブとして、これまで我々はシングルリード量子ドット中のゼーマン分裂した準位を利用した方法を実証してきた。本研究ではこの手法をさらに発展させ、量子ドット中の 2 電子状態を用いることにより、低磁場においてもスピン偏極を検出できる手法を確立した。

シングルリード量子ドット構造を使って量子ドットを測定対象に結合させ、ドットへのトンネルレートを測定する。これにより測定対象内のスピン偏極を低擾乱で測定できる。量子ドット中の 2 電子状態は、低磁場では基底状態がスピンシングレット、励起状態がスピントリプレットであり、測定対象がスピン偏極している場合には反平行スピンがないため、シングレットへのトンネルが抑制される。このトンネルの抑制を利用すれば、逆にトンネルレートより測定対象内のスピン偏極を調べることができる。我々はスピン分離した量子ホールエッジ状態を測定対象として用いて、実際にスピン偏極が形成された際にはシングレットへのトンネルが抑制されることを観測し (図 2)、この検出手法が

動作することを確認めた。

この手法は半導体微細構造中のスピン偏極を局所的に低擾乱で測定できるというこれまでのプローブにない長所を持っている。この手法を固体中の興味深いスピン現象（スピン軌道相互作用を用いたスピン偏極の生成や量子ポイントコンタクトの0.7構造等）に適用することにより、ミクロな視点からスピン現象を解明できると期待できる。

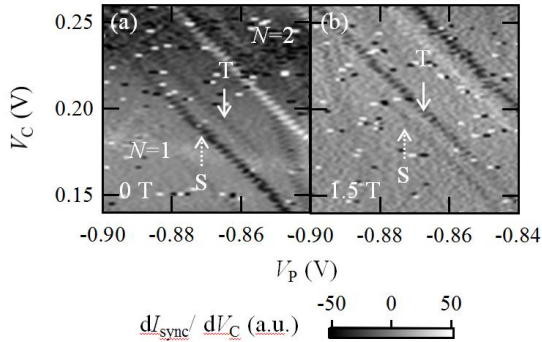


図2 スピン偏極に伴うシングレット信号の抑制
スピン偏極の生成 ((a)→(b)) とともにシングレットの信号線強度が弱くなっている。

(3) 量子ホールエッジ状態の局所スピン偏極の観測

量子ホールエッジ状態における局所スピン偏極は、量子ドット中のスピン状態との結合等、スピンを用いた多数量子系を形成する際に重要となる。そこでホールバーに結合したシングルリード量子ドットを用いて(2)の手法を適用し、量子ホールエッジ状態の局所的なスピン偏極を測定した。

ゼロ磁場からスピン分離したエッジ状態が形成されるまで磁場を変化させながら、シングルリード量子ドットへの電子のトンネルレートを調べ、試料端の局所スピン偏極がどのように変化するかを調べた。この結果、図3(a)のように0.5Tほどの低磁場から有限のスピン偏極が観測され始め、2Tほどで完全なスピン分離が観測された。図3(b)のように通常のマクロな電圧プローブを用いた測定では0.5Tではスピン分離は観測されず、このスピン偏極は試料端の局所的なものであることが分かった。これらの結果は、磁場の増大とともにまず試料端に局所的なスピン偏極が形成され、その後スピン分離したチャンネルが形成されることを示している。

これらの結果は、我々の知る限り量子ホールエッジ状態における局所的なスピン偏極の形成過程を調べた初めての結果である。またこの結果は通常の量子ドット構造において観測されたスピン依存伝導の結果 (M. Ciorga et al. Physica E 2001) とコンシステントなものとなっている。これらの知見は、量子ホールエッジ状態を用いた量子ドット

スピンの初期化、読み出し等、量子情報処理などへの応用の際にも重要となる。

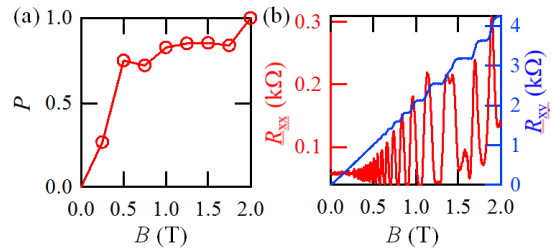


図3 (a)シングルリード量子ドットを用いた局所プローブで観測されたスピン偏極 (b)通常のマクロな電圧プローブでの測定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① Tomohiro Otsuka, Eisuke Abe, Yasuhiro Iye, Shingo Katsumoto, “Probing local electronic states in the quantum Hall regime with a side-coupled quantum dot”, Physical Review B 81, 245302-1, 2010, Refereed.

[学会発表] (計2件)

① Tomohiro Otsuka, Yuuki Sugihara, Jun Yoneda, Shingo Katsumoto, Seigo Tarucha, “Detection of spin polarization with two-electron states in a single-lead quantum dot”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, June 30 2012 accepted, Zurich, Switzerland, Oral, Refereed.

② 大塚朋廣、杉原裕規、米田淳、小幡利顕、勝本信吾、樽茶清悟、
「シングルリード量子ドット中の2電子状態を用いたスピン偏極検出」、
日本物理学会、2012年3月26日、西宮、口頭、査読無し

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 朋廣 (OTSUKA TOMOHIRO)
東京大学・大学院工学系研究科・研究員
研究者番号：50588019