

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19674001

研究課題名（和文） 半導体ナノ構造における量子相関の生成と検出

研究課題名（英文） Generation and Detection of Quantum Correlation in Semiconductor Nanostructures

研究代表者

小林 研介（KOBAYASHI KENSUKE）

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：10302803

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：メゾスコピック系、量子雑音

1. 研究計画の概要

二つ以上の粒子の間に非局所的な量子相関が保持されている状態をエンタングルメントと呼ぶ。エンタングルメントは、量子力学において最も特異な概念であると同時に、今日の量子情報技術の基盤概念であるため、その生成と制御は極めて重要である。

近年の微細加工技術の進展により、我々は様々な半導体ナノ構造を作製し、量子効果を制御できるようになった。しかしながら、典型的な量子状態であるエンタングルメントの生成に関しては、光子系では既に実現されているのに対し、電子系においては現在も挑戦的な課題として実験家に残されている。

本研究の目的は、固体素子において電子系のエンタングルメントを生成し、量子雑音相関測定によってそれを検出することである。本研究によって固体素子中に電子のエンタングルメントが生成できることが実証されれば、現実的な量子情報処理システムの構築にとって大きな一歩になる。

2. 研究の進捗状況

エンタングルメント検出を目指す本研究の核となるのは、高精度の量子雑音測定技術である。我々は、電子温度 20 mK において、測定感度 $10^{-29} \text{A}^2/\text{Hz}$ という、高感度量子雑音測定系を構築することに成功した。現在、電子波干渉計などのエンタングルメントの舞台となる半導体ナノ構造を用いて量子雑音測定を行っている。光子とは異なり、電子は電荷・スピンを有するフェルミオンであるため独自の多彩な量子・多体現象が発現するが、我々の量子雑音測定によってその新たな一面が明らかとなってきた。以下に、本研究に

おいて達成した成果の一部を述べる。

（1）量子雑音放射の精密測定

量子ポイントコンタクト（QPC）における量子雑音に関しては、理論的によく調べられている。我々是对向した一組の QPC を有する素子を作製し、一方で発生した量子雑音が他方に与える影響について調べた。発生した量子雑音は、他方の QPC へと受け渡され、熱へ変換される。このことを利用して、感度 1 fW 程度という高精度の熱放射測定を実証した。

（2）電子干渉計における非平衡位相緩和

マッハ・ツェンダ干渉計において、近年見いだされた特徴的な非平衡位相緩和現象は、起源が不明であった。我々は、ファブリ・ペロ干渉計とアハロノフ・ボームリングという、二種類の電子干渉計においても同様の非平衡位相緩和の観測に成功し、その緩和を特徴付けるエネルギースケールが干渉計の大きさでほぼ決まることを見出した。

（3）量子系における揺らぎの定理の検証

我々は、電子干渉計を用いて量子雑音の精密測定を行い、非線形性と非平衡性を定量的に結びつける関係式を見だし、その結果が揺らぎの定理に基づく予想に合致することを見いだした。この結果は量子系における揺らぎの定理を世界で初めて実験的に検証したことになる。

高精度量子雑音測定によって得られた上記の成果は、エンタングルメント生成と検出に必要な不可欠の基盤を与えるものである。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

判断の理由は以下の3つである。

(1) 量子雑音測定系の開発の成功

我々が開発した量子雑音系は、世界的に見てもトップクラスの量子雑音測定系である。低温増幅器の開発に予定よりも早く成功したこと、および、低温増幅器を用いると高周波数領域で実験が可能となるため、実験時間が10~100分の1程度に短縮されたことの二つの理由により、研究が大きく進展した。実際、得られた技術的なアドバンテージを活かして、現在までに数々の新しい学術的知見を得ることができた。

(2) 微細加工技術の進展

測定技術とやらんで重要なのは、微細加工技術を用いた半導体ナノ構造の作製である。現在では、マッハ・ツェンダ電子干渉計が二つ接合されたダブル・マッハ・ツェンダ電子干渉計などが作製可能となっている。

(3) 核スピン集団の制御法の開発

研究を進めていく過程で我々は半導体ナノ構造に電流を注入することにより、局所的に核スピンの偏極集団を生成することができることを見いだした。また、その状態で量子雑音を測定し、電子スピンの核スピンによって散乱されるダイナミクスを観測することにも成功した。

以上のような理由により、当初の目標を超える研究の進展があると判断する。

4. 今後の研究の推進方策

(1) マッハ・ツェンダ干渉計において、現在50%を超える高い干渉強度を得ると同時に、量子雑音の測定にも成功している。今後、量子雑音相関の測定を行いベル不等式の破れを実証する。

(2) 我々は、近藤状態にある量子ドットにおける量子雑音が多体効果を反映して増大することを示した。今後は、スピン-重項形成によるエンタングルメントを実証する。

(3) 我々は量子細線内に動的核スピン偏極状態を生成することに成功した。今後は核スピン集団のエンタングルメントを実証する。

5. 代表的な研究成果

(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15件)

1. S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, K. Saito, Y. Utsumi, A.C. Gossard: "Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Coherent Conductor", *Phys. Rev. Lett.* **104**, 080602-1-080602-4 (2010).

2. Y. Yamauchi, M. Hashisaka, S. Nakamura, K. Chida, S. Kasai, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, D. C. Driscoll, A. C. Gossard, K. Kobayashi: "Universality of bias- and temperature-induced dephasing in ballistic electronic interferometers", *Phys. Rev. B* **79**, 161306-1-161306-4 (Rapid) (2009).

3. S. Nakamura, M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Kasai, T. Ono, K. Kobayashi: "Conductance anomaly and Fano factor reduction in quantum point contacts", *Phys. Rev. B* **79**, 201308-1-201308-4 (Rapid) (2009).

4. M. P. Delmo, S. Yamamoto, S. Kasai, T. Ono, K. Kobayashi: "Large positive magneto resistive effect in silicon induced by the space-charge effect", *Nature* **457**, 1112-1115 (2009).

5. M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Nakamura, S. Kasai, T. Ono, K. Kobayashi: "Bolometric detection of quantum noise in coupled mesoscopic systems", *Phys. Rev. B* **78**, 241303-1-241303-4 (Rapid) (2008).

[学会発表] (計56件)

小林研介、「半導体メゾスコピック系における電子のコヒーレンスと多体効果の制御に関する研究」(日本物理学会第64回年次大会、立教学院池袋キャンパス2009年3月28日)。

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 磁気抵抗素子及び磁気感応スイッチ

発明者: 小林研介、小野輝男

番号: 特願2009-136275

出願年月日: 2009年6月5日

国内外の別: 国内

名称: 磁気抵抗素子及び磁気感応スイッチ

発明者: 小林研介、小野輝男

番号: PCT/JP2010/52409

出願年月日: 2010年2月18日

国内外の別: 国際

[その他]

ホームページ等

<http://ssc1.kuicr.kyoto-u.ac.jp/indexj.html>