

機関番号：14301

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2007～2010

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

研究成果の概要（和文）：独自に開発した高感度電流雑音測定系を用いることによって、電子干渉計、量子ドット、量子細線というエンタングルメント生成と検出の舞台となる半導体ナノ構造における量子雑音測定を行った。その結果、量子系におけるゆらぎの定理の初の検証実験や、核スピン偏極集団の生成などの成果を得た。本研究によって、高精度の電流雑音測定がエンタングルメント検出および非平衡輸送現象のプロブとして必須であることが確立した。

研究成果の概要（英文）：We have successfully developed a high-sensitive measurement system for current fluctuation in mesoscopic systems, which was applied to measure the dynamical transport through various semiconductor nanostructures such as electron interferometers, quantum dots, and quantum wires. These nanostructures are recently envisaged to be a nice stage to create and detect electronic entanglement. We demonstrated the first experimental test of "fluctuation theorem" in quantum regime and the generation of the polarized nuclear systems. Our achievement convincingly confirms that the precise noise measurement is indispensable to address the entanglement and the nonequilibrium transport phenomena.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2008年度	24,100,000	7,230,000	31,330,000
2009年度	20,900,000	6,270,000	27,170,000
2010年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
総計	77,500,000	23,250,000	100,750,000

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. 研究開始当初の背景

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、光子系では既の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。

2. 研究の目的

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。

また、本研究で開発する雑音測定法は、光子系にはない電子系特有の多体状態への展開が可能であり、非平衡系への適用をも含む広大な未踏研究領域の開拓を可能とする。この点において、本研究は、ボゾン（光子）によるエンタングルメント検出実験のフェルミオン（電子）版である、という意義だけにとどまらない独自の特色と将来の可能性を備えている。

3. 研究の方法

エンタングルメント生成を行う系は、主として、半導体二次元電子系上に作製される電子干渉計と量子ドットの二つである。エンタングルメント生成を実証するために、量子雑音測定法および量子相関測定法を新規に開発し、エンタングルメントを検証する。

4. 研究成果

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。しかしながら、検出に必要とされる精度は市販の測定器の組み合わせでは実現できない。そこで、本研究はこの技術を開発することから開始した。その結果、電子温度 20mK において、測定感度 $10^{-29} \text{A}^2/\text{Hz}$ という、世界有数の高感度量子雑音測定系を構築することに成功した。

引き続き、電子波干渉計などのエンタングルメント生成と検出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い、非平衡電子ダイナミクスの研究を行ってきた。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いった。以下に、本研究において現在までに達成した成果を述べる。

(1) 量子雑音放射の精密測定

量子ポイントコンタクト (QPC) を用いることで、量子化された伝導状態を得ることができる。また、QPC における量子雑音に関しては、理論的によく調べられ理解されているため、雑音測定系のテストを行うには最適である。我々は対向した一組の QPC を有する素子を作製し、一方の QPC で発生した量子雑音が他方の QPC に与える影響について調べた。

量子雑音は、バイアス電圧程度の周波数領域 ($\sim 100 \text{ GHz}$ 程度) までフラットな特性を持つため、高周波成分は、キャパシティブに他方の 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 (図 1)。これは雑音測定によって高精度な bolometry が可能であるという独創的な成果である。

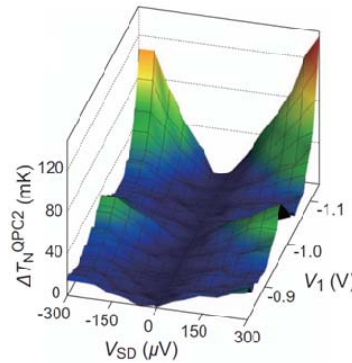


図1: QPCにおける量子雑音放射を熱に変換して計測した結果。

(2) 量子雑音測定によるスピン分極率測定

QPC における伝導度の振る舞いには、単純な自由電子モデルでは理解できない振る舞い「アノマリ」が見られることが知られている。我々は、QPC の静電ポテンシャルを制御することで、アノマリの出現を制御することに成功した。また量子雑音測定によって、長年謎であったアノマリの原因は、伝導チャネルがスピン分極したためであることを明らかにした。スピン分極率はゲート電圧によって制御可能であり、最大で 67 パーセントの分極が得られた。このことは非磁性の半導体において、電子間相互作用によってスピン偏極電流を生成できることを示した、学術的なインパクトの高い結果である。

(3) マッハ・ツェンダ干渉計における量子雑音測定

電子系におけるエンタングルメント生成の舞台として注目されているのが電子版マッハ・ツェンダ干渉計である。我々はこの系を用いて、干渉強度 (ビジビリティ) の温度依存性と量子雑音を測定した。我々の実験の特徴は、熱雑音を測定することによって正確な電子温度が決定できることであり、それによって、ビジビリティが温度に対してどのように振る舞うかを定量的に明らかにした。

(4) 電子干渉計における普遍的な非平衡位相緩和

エンタングルメント生成の舞台として注目される電子マッハ・ツェンダ干渉計であるが、近年、電子の干渉性が失われる現象 (位

相緩和、デコヒーレンス) が大きな問題となっている。実際、非平衡状態において見いだされた特徴的な位相緩和現象(「ローブ構造」と呼ばれる)は、予想外であり、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ローブ構造の観測に成功し、その構造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(図2)。このように非平衡位相緩和現象に普遍性があることは本研究で初めて見いだされたものであり、干渉計内の伝導電子間に働くクーロン相互作用が位相緩和の原因であることを示唆する。バリスティック系における電子の位相緩和は長らく謎であったが、この成果は定量的にその謎の解明の糸口を与えた点で特筆すべきものである。

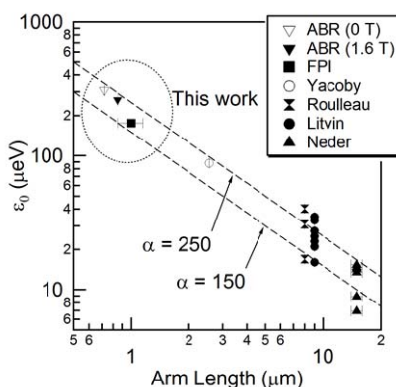


図2: 電子干渉計における非平衡位相緩和を特徴付けるエネルギースケール(縦軸)が、干渉計のサイズ(横軸)に反比例することを示す結果。過去の実験も併せて解析し、普遍的なメカニズムの存在を明らかにした。

(5) 量子系における「揺らぎの定理」の検証

物理学においては、系の応答を記述する理論として線形応答理論が確立しているが、その限界を超えて非平衡系をよりよく理解しようという試みが長年行われてきた。その一つが「揺らぎの定理」である。これまで、揺らぎの定理は、古典系では実験的に検証されてきたが、量子系において成り立つかどうかは、未解明であった。我々は、電子干渉計を用いて量子雑音の精密測定を行い(図3)、実験的に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。電子干渉計における電気伝導は電子の量子性を反映したものであるため、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。このような研究は、量子力学と統計力学の両方に関わる根源的な問題に実験的にアプローチしていく端緒を与え、非平衡統計物理学の新

しい展開を生み出す点で多方面に大きなインパクトを与える成果である。

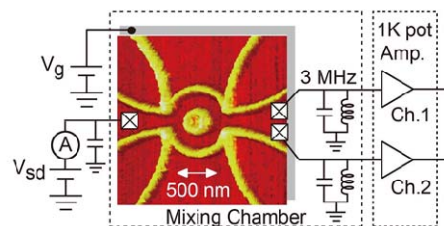


図3: 量子コヒーレント系における「揺らぎの定理」の検証実験に用いた電子干渉計と測定系概念図。

(6) 半導体ナノ構造における核スピン偏極集団の生成と制御

量子ホール状態にある半導体二次元電子系上に作製されたナノ構造において、バイアス電圧を印加することによって動的核スピン偏極を生じさせることができることを見いだした。その様子を、伝導度測定・量子雑音測定・NMR測定によって調べ、数10nm×数100nm程度の非常に小さい領域に局所的に核スピン偏極集団が生成されていることを証明した。このことは、エンタングルメント状態にある核スピン偏極集団の制御につながる成果である。

(7) 非磁性半導体における巨大磁気抵抗効果の発見

シリコンがある特殊な条件下で巨大な磁気抵抗効果を発現することを見いだした。我々は、この現象が電子間のクーロン相互作用に基づく新しい伝導現象であることを明らかにした。今後、雑音測定を行うことにより、伝導メカニズムの詳細をより定量的に明らかにできると考えている。

今後の展望

以上のように、独自に開発した世界有数の高感度を持つ電流雑音測定系を用いることによって、電子波干渉計や量子ドットというエンタングルメント生成と検出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い、非平衡電子ダイナミクスの研究を遂行した。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・多体现象が発現する。実際に、我々の量子雑音測定によって、電子の量子的な輸送におけるダイナミクスに関して、数々の新しい知見が得られた。

本研究によって、高精度の電流雑音測定が、エンタングルメント検出および非平衡統計力学のプローブとして有用であることが確立し、今後の物性研究にとって有用なツールとしてますます発展していくことが期待される。

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 16 件)

1. Koji Sekiguchi, Tomonori Arakawa, Yoshiaki Yamauchi, Kensaku Chida, Masaki Yamada, Hiromasa Takahashi, Daichi Chiba, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, "Observation of Full Shot Noise in CoFeB / MgO / CoFeB-based Magnetic Tunneling Junctions", *Applied Physics Letters* **96**, 252504-1-252504-3 (2010) (査読有).
2. Masayuki Hashisaka, Andreas Helzel, Shuji Nakamura, Leonid Litvin, Yoshiaki Yamauchi, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Hans-Peter Tranitz, Werner Wegscheider, Christoph Strunk, "Temperature dependence of the visibility in an electronic Mach-Zehnder interferometer", *Physica E* **42**, 1091-1094 (2010) (査読有).
3. Shuji Nakamura, Yoshiaki Yamauchi, Masayuki Hashisaka, Kensaku Chida, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Renaud Leturcq, Klaus Ensslin, Keiji Saito, Yasuhiro Utsumi, and Arthur C. Gossard, "Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Coherent Conductor", *Physical Review Letters* **104**, 080602-1-080602-4 (2010) (査読有).
4. Michael P. Delmo, Shinpei Yamamoto, Shinya Kasai, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi, "Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect", *Nature* **457**, 1112-1115 (2009) (査読有).
5. Yoshiaki Yamauchi, Masayuki Hashisaka, Shuji Nakamura, Kensaku Chida, Shinya Kasai, Teruo Ono, Renaud Leturcq, Klaus Ensslin, Daniel C. Driscoll, Arthur C. Gossard, and Kensuke Kobayashi, "Universality of bias- and temperature-induced dephasing in ballistic electronic interferometers", *Physical Review B* **79**, 161306-1-161306-4 (Rapid Communications) (2009) (査読有).
6. Shuji Nakamura, Masayuki Hashisaka, Yoshiaki Yamauchi, Shinya Kasai, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi, "Conductance anomaly and Fano factor reduction in quantum point contacts", *Physical Review B* **79**, 201308-1-201308-4 (Rapid Communications) (2009) (査読有).
7. Masayuki Hashisaka, Yoshiaki Yamauchi, Kensaku Chida, Shuji Nakamura, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, "Noise measurement system at electron temperature down to 20 mK with combinations of the low pass filters", *Review of Scientific Instruments* **80**, 096105-1-096105-2 (2009) (査読有).
8. Michael P. Delmo, Shinya Kasai, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, "Current-controlled magnetoresistance in silicon in non-Ohmic transport regimes", *Applied Physics Letters* **95**, 132106-1-132106-3 (2009) (査読有).
9. Masayuki Hashisaka, Yoshiaki Yamauchi, Shuji Nakamura, Shinya Kasai, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi, "Bolometric detection of quantum shot noise in coupled mesoscopic systems", *Physical Review B* **78**, 241303-1-241303-4 (Rapid Comm.) (2008) (査読有).

[学会発表] (計 73 件)

※招待講演 (13 件) のみを記載する。

1. 小林研介: 「半導体量子系における非平衡電流雑音」(新学術領域研究「動的相関光科学」・第 4 回 DYCE シンポジウム、京都大学、2011 年 01 月 06 日)。
2. Kensuke Kobayashi: "Non-equilibrium Noise in Mesoscopic Systems" (Global COE seminar, University of Tokyo, December 14, 2010).
3. 小林研介: 「半導体量子系における『ゆらぎの定理』の検証実験」(基礎研究会「非平衡系の物理—非平衡ゆらぎと集団挙動—」、京都大学基礎物理学研究所、2010 年 11 月 18-20 日)。
4. Kensuke Kobayashi: "Large Positive Magnetoresistive Effect Induced by the Space-Charge Effect in Silicon", the 30th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS-30) (Seoul, Korea, July 25 - 30, 2010).
5. 小林研介: 「半導体量子系における『ゆらぎの定理』の検証実験」(「古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ」、東京大学弥生キャンパス、2010 年 2 月 12-14 日)。
6. 小林研介: 「半導体メゾスコピック系における電子および核スピン依存量子伝導」(第 14 回半導体スピン工学の基礎と応用 (PASPS-14)「半導体スピントロニクスの展開」、慶応大学日吉キャンパス、2009

- 年 12 月 21-22 日)。
7. Kensuke Kobayashi: "Large Positive Magnetoresistive Effect Induced by the Space-Charge Effect in Silicon" (International IMR Workshop on Group IV Spintronics, Sendai, Japan, October 5-6, 2009).
 8. Kensuke Kobayashi: "Large Positive Magnetoresistive Effect Induced by the Space-Charge Effect in Silicon" (Korean Physical Society Meeting, Daejon, Korea, April 23, 2009).
 9. 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」(第 3 回(2009 年)日本物理学会若手奨励賞受賞講演、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)。
 10. 小林研介:「半導体二次元電子系上の量子ポイントコンタクトにおけるスピン依存伝導」(第 1 回界面科学研究会、岡山大学、2008 年 12 月 19 日)。
 11. Kensuke Kobayashi: "Tuning of the Spin-dependent Transport in Quantum Point Contacts" (The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Spin Transport in Condensed Matter (STCM), Kyoto, Japan, October 27 - November 28, 2008).
 12. Kensuke Kobayashi: "Coherence and Correlation of Electrons in Quantum Hybrid Systems" (Moriond 2008: "Quantum Transport and Nanophysics", La Thuile, Italy, March 8-15, 2008).
 13. Kensuke Kobayashi: "Detection of shot noise in coupled mesoscopic systems" (International workshop "Interaction and Interference in Nanoscopic Transport", Dresden, Germany, February 18-23, 2008).

〔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

権利者: 小林研介、小野輝男

種類: 特許

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

権利者: 小林研介、小野輝男

種類: 特許

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

・京都大学化学研究所小野研究室 (代表者が 2012 年 3 月まで准教授として在職)

http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/onolab/public_html/indexj.html

アウトリーチ活動

1. 「磁石であそぼう」(京都大学宇治キャンパス公開 2007、2007 年 10 月 20 日-21 日、京都大学宇治キャンパス)。
2. 「磁石であそぼう」(京都大学宇治キャンパス公開 2008、2008 年 10 月 18 日-19 日、京都大学宇治キャンパス)。
3. 「磁石であそぼう」(京都大学宇治キャンパス公開 2009、2009 年 10 月 24 日-25 日、京都大学宇治キャンパス)。
4. 「磁石であそぼう」(京都大学宇治キャンパス公開 2010、2010 年 10 月 23 日-24 日、京都大学宇治キャンパス)。

新聞掲載

1. 「巨大磁気抵抗効果 京大、シリコンで発見 磁気センサーに応用も」、日刊工業新聞 (2009 年 2 月 26 日 27 面)
2. 「シリコンにも磁気抵抗効果 読み取り装置に応用も」、京都新聞 (2009 年 2 月 26 日 29 面)
3. 「シリコンに磁場 おや電気抵抗変化」、朝日新聞 (2009 年 2 月 26 日夕刊 9 面)
4. 「シリコンに高い電圧で巨大磁気抵抗効果」、産経新聞 (2009 年 3 月 4 日 21 面)
5. 「シリコンに磁気抵抗効果 京大化学研が発見」読売新聞 (2009 年 3 月 23 日 27 面)
6. 「小林氏、土居氏に湯川・朝永奨励賞」、京都新聞 (2010 年 12 月 23 日 22 面)

6. 研究組織

(1) 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