

人工量子系における量子相関の生成と検出

Generation and Detection of Quantum Correlation in Mesoscopic Systems

代表研究者 京都大学 小林 研介 Kyoto University Kensuke Kobayashi
協同研究者 京都大学 橋坂 昌幸 Kyoto University Masayuki Hashisaka
京都大学 山内 祥晃 Kyoto University Yoshiaki Yamauchi
京都大学 中村 秀司 Kyoto University Shuuij Nakamura

When two particles away from each other have a certain quantum correlation between them, the two-particle state is defined as “entanglement”. While this phenomenon is a direct deduction from quantum mechanics, it is counterintuitive. There has been a lot of and decades-long controversy as to whether the entanglement is a reality or not, which is so-called “EPR problem”. Recent nanotechnology enables us to control various quantum effects in many kinds of nanostructures such as artificial atoms and Aharonov-Bohm rings. However, the entanglement, which was already realized for photons in quantum optics, has never been realized in quantum electronics. We aim to address the generation and detection of electronic entanglement in semiconductor nanostructures. To this end, we have to develop the current-current correlation measurement scheme in a very precise way of the order down to $10^{-29} \text{ A}^2/\text{Hz}$ and also to develop the solid-state quantum device where the entanglement can be generated. Here, we report the

development of the measurement scheme and the quantum shot noise measurement performed in the semiconductor-based nanostructures.

研究目的

空間的に離れた二つの粒子の間に量子力学的な相関が保持されている状態をエンタングルメント（量子相関）と呼ぶ。例えば、その二つの粒子が（たとえ何 km も）空間的に離れていたとしても、一方の粒子の状態を測定すると他方の粒子の状態が瞬時に確定する。この現象は量子力学からの自然な帰結であるが、人間の直感に反する不思議な現象であり、量子力学誕生以来、多くの研究が積み重ねられてきている。

このエンタングルメントを積極的に利用するのが、量子コンピュータや量子通信などの量子情報技術であり、近年、世界的に大きな進展を見せている。しかしながら固体素子において電子のエンタングルメントを実現することは、実用上非常に重要であるにもかかわらず、現時点でもなお挑戦的な課題である。

本研究は、微細加工技術によって半導体中に微細人工量子系を作製し、量子系を通過する電流ゆらぎの相関を精密に測定することによって、エンタングルメントの生成と検出を目指すものである。本研究は、量子力学の基本原理に関わる実験としての意義と同時に、量子情報処理システムの実現に向けた必要不可欠なステップでもあると位置づけられる。

量子相関検出をおこなう際に鍵を握る測定技術が量子雑音測定である。半導体人工量子系に電子を入射すると、通過した電流にはその平均値のまわりに量子ショット雑音が発生する。これは、フェルミオンである電子の透過と反射を直接に反映する結果である。このゆらぎのスペクトルが量子雑音である（単位は A^2/Hz あるいは V^2/Hz ）。この手法を応用すれば、量子相関も得られる。例えば、半導体人工量子系から二電子が相関を持って放射された場合、両者の雑音相関は正となるであろう。これを検出することが、量子相関検出には必要不可欠である。しかし、そのためには、高精度の量子雑音測定が必要であり、その実験技法は確立していない。本研究では、この量子雑音（相関）測定という未開拓の測定技術の確立を行い、半導体人工量子系における量子相関の生成と検出を目指すものである。

研究経過

本研究では、助成期間内に、量子雑音測定手法の開発および微細加工による半導体人工量子系の作製を行い、次に作製した素子を用いて量子雑音検出を行った。以下に研究経過と得られた成果を述べる。

A. 量子雑音測定技術の開発

半導体人工量子系において量子力学的な状態を制御するためには、通常、試料を極低温（100mK 以下程度）におく必要がある。また、その抵抗値は、典型的には量子化コンダクタンスの逆数程度（10 k Ω 程度）である。さらに、量子相関測定に必要な測定精度は $10^{-29} \text{A}^2/\text{Hz}$ （あるいは $10^{-20} \text{V}^2/\text{Hz}$ ）以下程度である。したがって、これらの条件を満たすような量子雑音測定技術を開発することが重要である。しかしながら、そのような極低温における超精密測定の手法は未だ確立しておらず、それ自体が技術的にチャレンジングな課題である。

A-1. 交差相関測定法による極低温ゆらぎ測定

我々は最初の試みとして、交差相関法による量子雑音測定技術の開発を行った。極低温にある試料の量子雑音は、極低温下にある試料に電流を流し、室温にある電圧増幅器で試料の両端電圧を測定することによって得られる。ここで、シグナルを異なる二つの増幅器を通して測定する。得られた二つの信号を2チャンネル対応型のスペクトルアナライザに入力し、両者の相関スペクトルを測定する。長時間の平均を取ったスペクトルには、増幅器の雑音やリード線の熱雑音などの互いに相関の無い信号成分が除去され、試料における本質的な信号（量子雑音）のみが生き残る。一般に微小な電流（電圧）雑音を精密に定量的に測定するための実験系をくみ上げるには細心の注意が必要である。我々は、構築した測定系できちんと量子ゆらぎが測定できるかどうかを確立するために、抵抗体（10k Ω ）のゆらぎ測定を交差相関測定法により行った。抵抗体は希釈冷凍機内にセットされ、その温度は、50mK から 1K 程度である。また、測定すべき電圧ゆらぎは、抵抗体の熱雑音に由来するものであるが、その大きさは 100mK において $5 \times 10^{-28} \text{A}^2/\text{Hz}$ 程度である。希釈冷凍機の温度を変化させながら測定した結果、それに合致する熱雑音を得られた。

この手法の利点は、室温に増幅器を設置できるという簡便さにあるが、試料抵抗が大きいことと測定ケーブルの静電容量のため測定できる周波数領域が 10kHz 以下である。また、良い SN 比を得ようとすると測定に時間がかかる。しかも、実際に半導体人工量子系を使った測定の結果、1/f 雑音などの非本質的な雑音の影響を大きく受けることが分かった。

A-2. 極低温低雑音増幅器の開発

上記の結果を受けて、我々は低周波数領域での測定ではなく、高周波数領域での測定手法を開発することを決定した。高周波数の信号は、低温部分でのキャパシタンスロスによって減衰してしまうため、そのシグナルを室温まで持ってくるには、インピーダンス変換と信号増幅を行うための増幅器を低温部に設置することが必要である。しかしながら、低温動作可能な高精度の増幅器は市販されていない。我々は、そのような極低温低雑音増幅器の開発を1年以上にわたって進めて来た。開発に当たって特に重要であったのは、室温で動作する回路と異なり、キャパシタやインダクタ、トランジスタなどは、すべて極低温（2K 以下）で動作可能なものを選定しなくてはならない、という点であったが、結果として、極めて高精度の測定系を構築することができた。現在の測定系において、電流雑音の測定精度は 3MHz において $1 \times 10^{-28} \text{A}^2/\text{Hz}$ 以下程度に達している。

B. 微細加工法による半導体人工量子系の作製

我々は、測定系の開発と平行して、半導体の微細加工によって半導体人工ナノ構造を作製する手法の確立も行ってきた。試料は、(1) GaAs/AlGaAs 二次元電子基板を電子線描画によって微細加工 (2) Au/Ge 合金で二次元電子ガスにオーミック・コンタクトを作製 (3) ウェット・エッチングによりホールバー作製 (4) Au/Ti ショットキーゲート電極（幅 100nm 程度）を蒸着というプロセスによって作製する。

ショットキーゲート電極に負の電圧を印加することにより、二次元電子ガスの形状を任意にコントロールすることが可能となる。我々は電子数の制御が可能な量子ドット（人工原子）、量子ポイントコンタクト、量子細線などの人工ナノ構造を実現可能な試料を作製した。この系における量子雑音と量子相関を研究することは、今後のエンタングルメント実験への展開に向けて必要不可欠なステップである。

C. 量子雑音検出実験

以下に、構築した測定系と作製した半導体人工量子系を用いて行った量子雑音測定実験の結果について報告する。

C-1. 量子雑音の非局所検出

量子ポイントコンタクト（QPC）は、量子化された伝導度を制御することの出来る典型的な半導体人工量子系である。我々は、二つの QPC がキャパシティブに結合した系を用いて、量子雑音の非局所検出実験を行った。一方の QPC に有限バイアスを印加し（非平衡状

態に置き) 量子雑音源とする。また、他方の QPC は平衡状態に置き、その熱雑音を精密に測定することにより、温度計として用いる。二つの QPC 間は、100MHz 以下では絶縁されているが、GHz 以上の量子雑音に対しては信号が通過するように設計されている。このような量子系を用いることにより、ショット雑音によって発生した GHz 帯域の光子を検出し、そのことによる温度上昇を 10mK 以下の精度で検出することに成功した。

近年、人工原子を用いて、QPC からの量子雑音検出に成功した例が報告されている。その仕組みは、人工原子における離散エネルギー準位間隔を利用して、GHz の光子を検出し、それを DC 電流に変えて検出するという photon-assisted tunneling に基づくものである。これは、DC 電流を精密に測定すればよいという点では画期的なアイデアであり、非常に精度の高い測定が可能となっているが、バンド幅が極めて狭い。それに対し、QPC はエネルギー連続状態からなっているため、非常に広いバンド幅の光子を吸収することができる。我々の実験は、量子雑音を熱放射として (bolometric に) 検出することに成功した初めての例であると位置づけられる。

C-2.半導体ナノ構造におけるスピン分極の観測

QPC はシンプルな量子系であるが、古くから「0.7 構造」と呼ばれる伝導度の異常現象が観測されてきた。その起源はスピンに由来する多体効果であると考えられているが決定的な説明は未だ成されていない。我々は、これまでにない配置をもった QPC を作製し、QPC を構成する静電ポテンシャルを様々に変化させ、その状態で量子ショット雑音測定を行った。伝導度が小さい領域 (量子化伝導度のチャネル数が 1 以下) においては、伝導度とショット雑音から得られるファノ因子 (雑音因子) を組み合わせることによって、伝導チャネルの詳細を明らかにすることが出来る。我々は、QPC において伝導度の異常現象を静電的に制御し、伝導度に異常が生じるところでファノ因子にも異常が生じることを見出した。実験データから、我々は伝導チャネルがスピン分裂していることを見出した。その分極率は極めて大きなものである。この実験は、非磁性の半導体において、電子間相互作用を利用することによって、大きなスピン分極を生じさせることができるという、初めての成果である。

考察

本研究期間内に、我々は、当初の目標であった量子雑音の高精度測定に成功することが出来た。また、そのことを利用して (1) 量子雑音の熱放射的検出 (2) 半導体素子におけるスピン分極電流の生成を実証することができた。これらの結果は、量子相関測定を行

うための必須の要素技術を構成している。その一方、量子相関測定を現実の半導体人工量子系に適用することは、今後の課題である。そのためには、まず、極低温低雑音増幅器の精度をさらに一桁上昇させる必要がある。また、現在の電子温度は 100mK 程度であるが、10mK 程度に低減させる必要がある。また、量子相関を生成することのできる半導体素子を作製する必要もある。以上は、現時点では、技術的な課題として残ってはいるが、我々はそれぞれに対して解決策を持っており、今後数年以内の達成を予定している。

研究発表

口頭発表

1. 橋坂昌幸、中村秀司、山内祥晃、葛西伸哉、小野輝男、小林研介：「極低温における量子ポイントコンタクトのショットノイズ測定」日本物理学会第 62 回年次大会（北海道大学、2007 年 9 月）。
2. K. Kobayashi: "Detection of shot noise in coupled mesoscopic systems" (International workshop "Interaction and Interference in Nanoscopic Transport", Dresden, Germany, February 2008) (invited).
3. K. Kobayashi: "Coherence and Correlation of Electrons in Quantum Hybrid Systems" (Moriond 2008, "Quantum Transport and Nanophysics", La Thuile, Italy, March 2008) (invited).
4. 橋坂昌幸、山内祥晃、中村秀司、葛西伸哉、小林研介、小野輝男：「量子ポイントコンタクトによる量子ショット雑音の非局所検出」日本物理学会第 63 回年次大会（近畿大学、2008 年 3 月）。
5. 中村秀司、橋坂昌幸、山内祥晃、葛西伸哉、小林研介、小野輝男：「量子ポイントコンタクトにおける 0.7 構造の静電ポテンシャル制御」日本物理学会第 63 回年次大会（近畿大学、2008 年 3 月）。

誌上发表

1. M. Hashisaka, S. Nakamura, Y. Yamauchi, S. Kasai, T. Ono, and K. Kobayashi: "Development of a measurement system for quantum shot noise at low temperatures" *Physica Status Solidi* (c) **5**, 182 (2008).
2. M. Hashisaka, S. Nakamura, Y. Yamauchi, S. Kasai, T. Ono, and K. Kobayashi: *J. Phys. Conference series*, in press.