

量子多体効果に基づく 半導体素子の開発と 輸送ダイナミクスに関する研究

電子伝導機構の定量的理解に基づく半導体素子の新機能開拓を目指して

小林 研介

京都大学 化学研究所
准教授

研究の背景

半導体技術は、トランジスタの発明以来、材料科学と微細加工技術の両方の進展によって大発展を遂げてきた。そして現在、膨大な知見の蓄積を活かして、これまでに無いような機能を持つ次世代素子の開発が、量子情報技術・強相関科学・スピントロニクスなどの様々な研究分野で、活発に行われてきている。このような研究の目的は、電荷・スピンに基づく量子・多体効果を積極的に利用することによって、電子系の新しい機能を開拓することにある。

既存の半導体エレクトロニクスは、古典的な一電子描像で精密に記述される。平衡状態の性質だけでなく、非平衡状態で動作するトランジスタのような能動素子に対しても、理論は定量的にその振る舞いを予言でき、そのことによって、半導体技術は大きな成功をおさめてきた。しかしながら、量子・多体効果が顕著な次世代素子においては、既存の方法論は、そのままでは適用できない。したがって、それらの効果を積極的に利用した新しい電子伝導機構を探索することや、そのような素子における非平衡状態を定量的に理解することは、次世代素子開発における本質的に重要な課題となっている。

研究の成果

本研究では、微細加工を駆使して作製された極小の素子を主たる舞台として、そのような素子ならではの電子伝導機構を探索すること、そして、(特に非平衡状態の)電子伝導ダイナミクスを定量的に理解するこ

とを目指して研究を行い、以下のような成果を得てきた。

1. 量子輸送現象における ファノ効果の確立

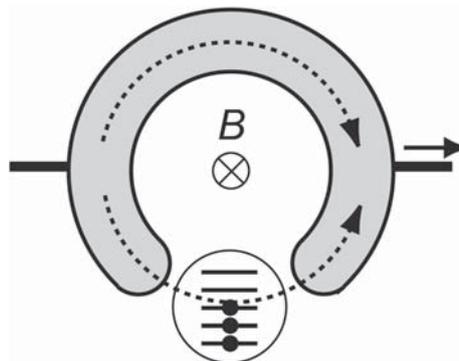
電子の波動性と粒子性という量子力学の本質に関わる実験はさまざまな系において行われてきた。中でも、半導体ヘテロ構造を微細加工して作製される人工量子系は、デザインされた実験を高い制御性をもって行うことのできる系である。特に半導体中に形成される人工原子における単一電子トンネル効果(粒子性)と、電子干渉計における干渉効果(波動性)とのせめぎあい、電子の量子力学的ふるまいの本質を浮き彫りにするものである。

本研究では、人工原子と電子干渉計を組み合わせた「量子複合系」(図1)において、ファノ効果というユニークな共鳴干渉効果が生じることを世界で初めて実証した[1, 2]。さらに、ファノ効果と近藤効果が同時に発現したファノ-近藤状態という新しい多体量子状態も実現した[3]。このファノ-近藤効果の実現は、近藤効果とファノ効果という、それぞれ物性物理学と分光学における二つの典型的な現象を結びつける成果である。本研究における一連の成果によって、量子輸送現象におけるファノ効果の普遍性が確立した。

2. シリコンにおける巨大磁気抵抗効果

極小の半導体素子やキャリア密度の小さい半導体素子においては、バイアス電圧を印加することにより、極端な非平衡状態を生成することが可能である。本研究では、代表的な半導体であるシリコンを用いて、空間電荷効果という非平衡多体効果に基づく電子伝導に注目し、新機能の探索を行った。空間電荷効果とは、キャリア密度の小さい半導体に大量のキャリアを注入すると、内部に非一様な電場が生じ、キャリアが互いにクーロン斥力を及ぼしあって伝導するようになる現象を指す。本研究では、この空間電荷状態において、シリコンに巨大な磁気抵抗効果を発現させることに成功した[4]。シリコンは、現代の半導体産業の中核を担う物質であり、過去50年以上にわたって最もよく研究されてきた物質の一つであるが、このような巨大な磁気抵抗効果は本研究によって初めて明らかとなった。特に、室温においてもこの効果が顕著に生じること(図2)は、半導体の

図1 半導体電子干渉計に埋め込まれた人工原子の概念図
干渉計の直径は1 μ m程度



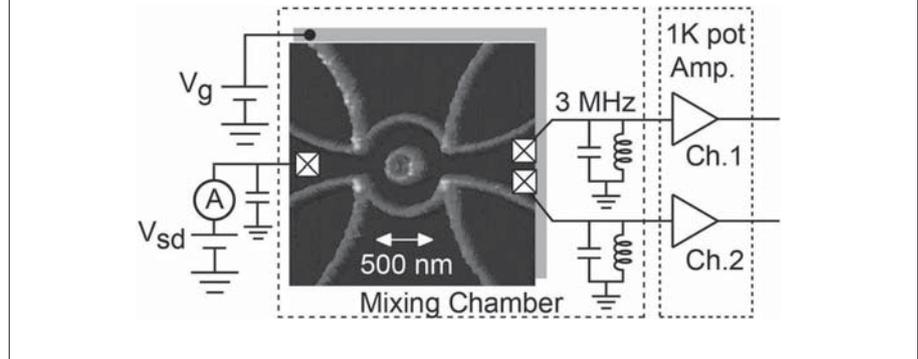
主役であるシリコンに注目すべき新機能が付与されたものといえる。

3. 「ゆらぎの定理」の検証

電子伝導のダイナミクスを定量的に理解することは、新しいメカニズムの探索と並んで重要である。本研究では、そのプローブとして、素子における電流ゆらぎ(電流雑音)に注目した。電流ゆらぎとは、系を通じた電流に含まれるゆらぎ成分(平均値の周りの分散)のことであり、時間平均された電流値では分からない、非平衡電子状態に対する定量的なプローブとなる。本研究では、電流ゆらぎ測定技術の開発から研究を開始し、数年かけて世界最高レベルの感度を持つ電流ゆらぎ測定系を構築した[5]。

開発した測定系を用いて、量子系における「ゆらぎの定理」の実験的検証を行った。1950年代に成立した線形応答理論は大きな成功を収めてきたが、それが適用できるのは、系が平衡状態付近にある時に限られている。しかし、1993年、非平衡状態においても成立する厳密な関係式「ゆらぎの定理」が発見された。この定理は、古典系において成立することが実験的に示されてきたが、量子系において成立するかどうかは未解明であった。本研究では、電流ゆらぎ測定を半導体電子干渉計に適用することで、非平衡多体量子系におけるゆらぎの定理を世界で初めて実証した[6](図3)。また、近藤効果の非平衡状態の検出にも成功した[7]。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

図3 量子系における「ゆらぎの定理」の検証実験に用いた微小な半導体電子干渉計の原子間力顕微鏡写真と電流ゆらぎ測定系の概略図



衡物理学の新展開を生み出すものと期待される。

将来の展望

本研究によって、電子の量子・多体効果を利用した特色ある電子伝導メカニズムを探索していくことや、既存の理論的な枠組みを超えて非平衡多体ダイナミクスを定量的に記述することへの端緒が開かれた。しかし、固体素子の持つ利点を活かしたこのような研究は、世界的にもまだ始まったばかりである。

全く新しい現象が発見される可能性も高い。今後も、量子・多体効果を精密に制御できる固体素子を用いて、独自の高精度の測定を行うことによって、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行っていきたい。

本研究は、東京大学物性研究所および京都大学化学研究所において行われたものであり、両研究所ならびに国内外の多くの共同研究者との共同研究に基づいております。共同研究者の皆様に、深く御礼申し上げます。

References(参考文献)

- [1] K. Kobayashi, H. Aikawa, S. Katsumoto, and Y. Iye, "Tuning of the Fano Effect through a Quantum Dot in an Aharonov-Bohm Interferometer", *Physical Review Letters* 88, 256806 (2002).
- [2] K. Kobayashi, H. Aikawa, A. Sano, S. Katsumoto, and Y. Iye, "Fano Resonance in a Quantum Wire with a Side-coupled Quantum Dot", *Physical Review B* 70, 035319 (2004)
- [3] M. Sato, H. Aikawa, K. Kobayashi, S. Katsumoto, and Y. Iye, "Observation of the Fano-Kondo Anti-Resonance in a Quantum Wire with a Side-Coupled Quantum Dot", *Physical Review Letters* 95, 066801 (2005).
- [4] M. P. Delmo, S. Yamamoto, S. Kasai, T. Ono, and K. Kobayashi, "Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect", *Nature* 457, 1112 (2009).
- [5] M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Nakamura, S. Kasai, T. Ono, and K. Kobayashi, "Bolometric detection of quantum shot noise in coupled mesoscopic systems", *Physical Review B* 78, 241303 (Rapid Communications) (2008).
- [6] S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, K. Saito, Y. Utsumi, and A. C. Gossard, "Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Coherent Conductor", *Physical Review Letters* 104, 080602 (2010).
- [7] Y. Yamauchi, K. Sekiguchi, K. Chida, T. Arakawa, S. Nakamura, K. Kobayashi, T. Ono, T. Fujii, R. Sakano, "Evolution of the Kondo effect in a quantum dot probed by shot noise", *Physical Review Letters* 106, 176601 (2011).

図2 非平衡状態にあるシリコンで発現する巨大な磁気抵抗効果

