

「量子効果等の物理現象」  
平成8年度採択研究代表者

大塚 洋一

(筑波大学物理学系 教授)

## 「金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用の研究」

### 1. 研究実施の概要

本研究の目的は、微小トンネル接合で生じる個々の電子の間歇的なトンネルによる輸送（単一電子トンネル現象）における新しい物理現象を、応用を視野に入れつつ、探索し検証することである。微小トンネル接合研究グループでは、・微小トンネル接合作製技術の開発、・基本素子である単一接合や単電子トランジスタにおけるトンネル素過程の物理を中心とした研究、・電子素子や回路への応用の各側面から研究を、またこれとは別に、量子カオス研究グループでは量子カオスとエネルギー準位に関する理論的研究をそれぞれ進めている。その結果、これまでに、・超伝導単一トンネル接合における散逸による超伝導絶縁体転移の実験的確認、・超伝導単一クーパー対箱における電荷コヒーレント状態の観測、・超伝導単一電子トランジスタの臨界電流、・微小トンネル接合を応用した局所超伝導エネルギーギャップの測定、・強磁性体単一電子トランジスタにおけるトンネル磁気抵抗効果の異常増大の発見、・強磁性体単一電子トランジスタにおける磁気クーロン振動の発見とその発現機構の解明、・抵抗結合型単一電子トランジスタの開発などの成果をあげた。また、単一電子デバイスの動作温度を上げるために電子線リソグラフィ法による超微細加工や金微粒子の自己組織化膜を用いたデバイスの作製に取り組んでいる。さらに、単一電子トランジスタをセンサーとする新しい表面走査型顕微鏡の開発も行った。一方、量子カオス研究グループでは、エネルギー準位間隔分布関数をランダム行列理論により調べ、新しいユニバーサルなクラスを見いだすなどの成果をあげた。

### 2. 研究実施内容

微小トンネル接合研究グループでは、・微小トンネル接合作製技術の開発、・単一接合や単電子トランジスタにおける物理、・電子素子や回路への応用の各側面から研究を、また量子カオス研究グループでは量子カオスとエネルギー準位に関する理論的研究を進めた。以下ではこれら各方面における平成10年度の研究進捗の状況を述べる。

## (1) 微小トンネル接合の物理

半導体量子ドットを用いたトンネル接合系と比較した時、金属トンネル接合の持つ大きな特徴の一つは、電極となる導体に多様な選択肢が許され、その電極物質の持つ個性と1電子トンネル効果が互いに関わる新しい現象が期待できることにある。このような観点から超伝導体や強磁性体を用いた微小トンネル系について研究を進めている。

### (1-2) 超伝導微小トンネル接合

#### 巨視的量子トンネル現象と散逸

超伝導単一微小ジョセフソン接合において一電子帯電エネルギーがジョセフソンエネルギーに比べて無視できなくなると巨視的物理量である超伝導位相の量子トンネル効果が現れる。このような巨視的量子トンネル効果はエネルギー散逸の有無によってその様相を大きく異にすることが予言されている。すなわち、トンネルにエネルギー散逸を伴うとトンネル確率が抑圧され、その結果、エネルギー散逸の度合いによって超伝導・絶縁体転移を示す。これまでに散逸源となる並列抵抗値を系統的に変える実験を行い、この系に実際に超伝導・絶縁体転移が起きることを明らかにしたが、新たにエネルギー散逸の機構として常伝導トンネル抵抗を付加した場合についての実験を行った。

### (1-3) 電荷コヒーレント状態の観測

微小ジョセフソン接合において2つの異なる粒子数状態間のコヒーレントな重ね合わせ状態の詳細を調べるために、量子コヒーレンス振動の時間領域における観測実験を目指している。すなわち、コヒーレント状態が確立するまでのダイナミクスを時間分解の方法で調べる。高速パルスをクライオスタット内の試料に印加できるようにさまざまな改良を加えた結果、初期的な結果を得ることに成功した。この実験は量子ビットの観点からも注目され、11年度以降大きな進展が期待できる。

### (1-4) 局所超伝導エネルギーギャップの測定

これまでの研究によって、超伝導微小トンネル接合のI-V特性から、接合近傍の局所的な超伝導エネルギーギャップの情報を得られることを明らかにした。これを応用し、微小超伝導体に微小トンネル接合を接続することで、微小超伝導体の磁気応答をエネルギーギャップを通して調べている。

### (1-5) 強磁性微小トンネル接合

#### 磁気クーロン振動

強磁性金属を使って作った単電子トランジスタの抵抗が外部磁場の関数として周期的に変化するという磁気クーロン振動現象が当チームで見出されたが、そのメカニズムについて詳しく考察を行い、モデルを提案するとともに、その妥当性を確かめるために様々な構成の単電子トランジスタについて磁気クーロン振動の有無、方

向、周期を調べた。その結果全ての実験結果は提案したモデルで矛盾無く説明できることが分かった。また、強磁性体3重接合系の示す特性も同様のモデルで説明できる。

## (2) 素子・回路への応用

### (2-1) 抵抗結合型SETの開発

現在利用されている静電容量的に結合したゲート電極を持つ C-SET に代わる新しい SET、抵抗結合型 SET(R-SET)の作成に成功した。R-SET は、C-SET で問題になる背景電荷の影響を受けず、かつ高い電圧ゲインを持つ素子として応用上重要であり、10 年以上前に提案されていたもののこれまで実現されずにいた素子である。今回、電子線リソグラフィ法と多重斜め蒸着法によってアルミニウム SET の島電極に直接高抵抗のクロム細線をつなげることにより R-SET を作ることに成功した。素子はきわめて安定に動作するが、電圧ゲインは素子のパラメータから期待された値よりも小さい。これは素子の実効温度が高いためであると考えられる。さらに、単電子トンネルの標準理論に基づき作成した R-SET の特性をシミュレートした結果、様々な条件における伝達特性を再現することができた。

### (2-2) 走査型SET顕微鏡の開発

SET は  $10^4e$  以下の電荷感度を持つ電荷敏感素子であり、かつその中心部分である島電極のサイズは  $1\mu\text{m}$  程度と小さい。そこで SET をプローブとした新しい走査型顕微鏡の開発を進めている。低温（液体ヘリウム温度）動作の摩擦力顕微鏡をベースに、そのプローブであるガラスファイバーの先端部に SET を取りつける方法を試みている。

### (3) 微細加工技術の開発

単一電子素子の実用化、高温動作化のためには、電子を蓄える島構造とトンネルバリアを、どのような材料で、より微細に、そして歩留まり良く高集積に作製するのが問題である。室温で動作させるためには、島構造の静電容量を約  $10^{-18}$  F 程度にまで小さくする必要があり、自己容量で換算するとこれは数 nm の広がりを持った構造に相当する。このような微細な構造を形成する方法として直径数 nm の大きさのものが手軽に準備することができる金属クラスターを単一電子素子に応用することを試みている。また従来法である電子線リソグラフィ法によってどこまで小さな構造を作ることができるかという限界にも挑戦している。

### (4) 量子カオスとエネルギー準位相関の理論的研究

エネルギー準位間隔分布関数をランダム行列理論により調べ、新しいユニバーサルなクラスを見いだした。また、その漸近的振る舞いを調べる方法を開発し、金属-非金属転移点近くでの数値計算の結果と比較した。エネルギー固有値が複素数となる複素ランダム行列を外場がある場合に、その状態密度を厳密にもとめた。この

結果は二次元磁場下の電子系に応用され、現在研究が進行中である。その他、超伝導磁束中のエネルギー励起準位を不純物散乱がある場合に理論的に調べた。ランダム行列理論へのクロスオーバー及び準位間遷移を議論した。

### 3. 主な研究成果の発表（論文発表）

- 大野圭司、島田宏、大塚洋一, “Ferromagnetic Single Electron Transistor”, *Solid-State Electronics* 42 (1998) 1407-1411.
- 島田宏、大野圭司、大塚洋一, “Magneto-Coulomb Oscillation in Ferromagnetic single Electron Transistors”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 67 (1998) 1359-1370.
- 大塚洋一, “強磁性単体電子トランジスタ”, *日本物理学会誌* 53 (1998) 342-345.
- 大野圭司、島田宏、大塚洋一, “Spin Polarization and Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Devices” *J. Phys. Soc. Jpn.* 67 (1998) 2852-2856.
- 山口直秀、八木隆多、小林俊一、大塚洋一, “Two-Dimensional arrays of Small Josephson Junctions with Regular and Random Defects” *J. Phys. Soc. Jpn.* 67 (1998) 729-731

他 15 件