

## 研究課題別 事後評価結果

1. 研究課題名: ナノメカニカル単一電子素子の創製

2. 研究代表者: 真島 豊 (東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授)

### 3. 研究内容及び成果

本研究は、ナノメカニカル単一電子素子の作製を目指すものであり、単一電子が金属ナノ粒子の機械的振動により逐次転送されるエレクトロンシャトル素子に関する研究を行った。

以下、これらの研究成果の概要について述べる。

#### 1) エレクトロンシャトル素子に関する研究

本研究ではエレクトロンシャトル素子の実現に向けて、素子構造の設計、作製プロセスの確立、素子動作の検証の3点を相互にフィードバックしつつ研究した。

##### ① 金ナノ粒子のアルカンチオール配位子のトンネルレート見積もり

エレクトロンシャトル素子を実現するためには、Åオーダーの金ナノ粒子の振動により二重トンネル接合におけるトンネル抵抗の大小関係が反転する柔構造を、Åオーダーの精度で設計・構築する必要がある。ここでは、配位子の鎖長の違いで抵抗値の違うこと等を活用して、アルカンチオールを配位子とした金ナノ粒子を含む二重トンネル接合におけるトンネル抵抗を見積もった結果、エレクトロンシャトル素子の動作周波数を考慮した上での素子構造設計を行うことが出来た。

##### ② 非接触原子間力顕微鏡による単一金ナノ粒子上の単一電子の計測

非接触原子間力顕微鏡を用いて静電気力の変化を計測することにより、外部電圧を加えた際に単一金ナノ微粒子上に単一電子が入り出す様子を測定した。その結果、クーロンブロッケード現象により、1個の金微粒子上に1個の電子および正孔が入り出す様子を明らかにすることが出来た。1個の電子の計測に成功した理由としては、1pNの精度で原子間力の電圧依存性を測定する計測系を独自に構築したことと、①の成果に基づいて金微粒子と金基板の間のトンネル抵抗を自己組織化単分子膜によって制御した点が挙げられる。

##### ③ カンチレバー型エレクトロンシャトル素子の実現

シリコン基板上にカンチレバーを設計・作製し、カンチレバーを励振させた場合、STM探針-カンチレバー間を流れるトンネル電流の距離依存性を計測したところ、STM探針とカンチレバー間の距離を変えた際に探針を流れるトンネル電流が $2ef$ の値で一定となるプラトー領域が見られ、さらに距離を近づけると $2ef$ の整数倍のところでプラトー領域が観察された。これらの測定結果から、トンネル電流が $2ef$ のプラトーでは一つの金ナノ粒子上において電子ならびに正孔がカンチレバーの振動に伴い一つずつ逐次転送されるエレクトロンシャトル素子として動作していること、 $2ef$ の整数倍のプラトーでは、エレクトロンシャトルと

して機能する金ナノ粒子数が整数倍に増加していることが明らかとなった。

#### ④自己励振エレクトロンシャトルを示唆する負性微分コンダクタンスの観察

走査型トンネル顕微鏡を用い、探針/真空/金ナノ粒子/金基板構造において探針を振動させた際に、エレクトロンシャトル現象により電子および正孔が出入りすることを、階段状トンネル電流と階段状変位電流の同時計測により明らかにした。この振動プローブを有する素子構造においてトンネル電流の電圧依存性を計測したところ、複数の電流ピークを含む負性微分コンダクタンスが繰返し観測された。これらのピーク電圧値はほぼ等間隔で並んでおり、間隔はクーロンステップ幅の約 2 分の 1 であることがわかった。これらの結果より、外部電圧印加時に金ナノ粒子と探針間での電子のやりとりに起因して金ナノ粒子に加わる静電気力が変化し、静電気力が変化する周波数と二重トンネル接合系の固有振動周波数が等しくなった際に、自己励振エレクトロンシャトル現象が起き、特異的に電流が増加したために負性微分コンダクタンスが観測されたと考えられる。

#### 2)金属内包フラーレン分子スイッチ

金属内包フラーレンが電界方向に並ぶことを利用し、上向きと下向きの二つの状態において、電流の流れ方が異なるスイッチとして機能することを見出した。金属内包フラーレンは、炭素からなるフラーレン殻に金属原子を内包した機能性分子であり、フラーレン殻と内包金属原子の間で電荷交換が起こる。テルビウム(Tb)金属内包フラーレン(Tb@C82; 炭素 82 個から形成されるフラーレン殻に Tb 金属原子を1つ内包した構造を持つ)は、内包金属である Tb 原子がプラス 3 価、フラーレン殻がマイナス 3 価に帯電しており、フラーレン殻内の Tb 原子の位置は中心からずれた位置に固定されている。このため、外観は対称である一方、電気的には非対称な構造となり、双極子モーメントを有している。したがって、金属内包フラーレンの向きによって電気的な性質は異なることが予想されていた。

本研究で得られた金属内包フラーレンスイッチに関する主な成果としては、金属内包フラーレン分子配向スイッチの 13K における動作実証や、液体窒素温度におけるスイッチ動作に向けた金属内包フラーレン分子の高分解 STM 像による観察等がある。

## 4. 事後評価結果

### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

期間中の外部発表、特許等の実績を示す。

発表論文: 15 件

その他著作・レビュー: 1 件

口頭発表: 82 件

特許出願: (国内) 3 件

単一金微粒子上の単一電子計測、その成果に基づくカンチレバー振動によるエレクトロンシャトル

ル動作の実現、および金属フラーレン内包分子のスイッチング現象の確認等は、科学的に大きなインパクトを持つ。特に、エレクトロンシャトル動作の実現に関しては、2005年の国際半導体技術ロードマップに新様式のデバイスとして引用されている等、世界をリードしている。また、金属フラーレン内包分子のスイッチング現象の発見は、金ナノ粒子を用いた素子の設計指針やプロセスを共有する等、分子機能のスイッチとしてユニークであり将来性は大きい。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

研究予算がそれほど潤沢ではない中で、このような精緻かつ独自性の高い研究が行われたことは高く評価出来る。また方法論について、電子物理のみならず材料についてまで踏み込んでいることを高く評価する。本研究の成果が国際半導体技術ロードマップに引用されたように、この科学的方法が電子デバイス、センサー等へ応用される日が来るであろう。その時までには材料系の研究者と良い関係を構築し、研究に厚みをつけることを望む。