

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608	
研究種目：若手研究(B)	
研究期間：2011～2012	
課題番号：23740237	
研究課題名（和文）	金属単原子ワイヤーにおける電流誘起力特性の実験的解明
研究課題名（英文）	Experimental study on current-induced force in metallic monatomic wires
研究代表者	
塩田 忠	(Shiota Tadashi)
	東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：40343165	

研究成果の概要（和文）：

本研究では、Current-induced force（電流誘起力）の特性を実験的に明らかにするため、ブレイクジャンクション法にチューニングフォーク（TF）を組み合わせた金属単原子ワイヤーの力学特性と電気特性の同時計測システムを構築した。TF を用いて計測される物性値に対し、従来モデルよりも定量的に良い近似を与えるモデルを明らかにした。このような知見と構築した計測装置により、極低温下で Au 単原子ワイヤーの電気伝導度と力学特性の同時計測を試み、単原子ワイヤー形成による TF の共振周波数シフトを確認した。検出される力学特性のバイアス依存性を検討したが、明確な依存性は見られなかった。

研究成果の概要（英文）：

Simultaneous measurement system on mechanical and electrical properties of a metallic monatomic wire was built to study experimentally a current-induced force in the wire. The mechanically controllable break junction combined with a tuning fork as a force sensor was used. Measured values using the tuning fork were analyzed by several theoretical models, and the model showing a good quantitative approximation was determined. Mechanical and electrical properties of Au monatomic wires were measured under a low temperature. Although it was observed that the resonance frequency of the tuning fork was shifted due to monatomic wire formation, a clear bias-dependence of the mechanical properties measured was not found.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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、金属単原子ワイヤー、ブレイクジャンクション、力学特性

1. 研究開始当初の背景

孤立金属単原子ワイヤーは、理想的な 1 次元電子系であるため、パリエルス転移、朝永ラッティジャー液体状態、1 次元プラズモンなどの低次元系特有の物性発現という基礎科学的観点からだけでなく、究極の微小配線や微小トランジスタへの利用という電子デバイス応用の観点からも注目されてきた。そのため、電気伝導特性について実験・

理論の両側面から数多く研究され、その結果、電気伝導度の量子化やパリティ振動、1 次元フォノンと電子の相互作用など、様々な 1 次元電子系に特有の電子物性が明らかにされている。

それと比較して、力学物性は単原子ワイヤーの形成過程や構造安定性に深く関わると考えられるがその理解は立ち遅れている。2000 年 Todorov らが理論的に示した

「Current-Induced Force (以下、電流誘起力とする)」は 1 次元系特有の力学特性の 1 例である。電流誘起力とは、金属単原子ワイヤーのような高電流密度下に存在する原子に働くと考えられている力であり、単原子ワイヤーの構造安定性に大きな影響を及ぼすと考えられている。また、最先端 LSI 中の微小配線や接点破断の原因の一つとされているエレクトロニマイグレーションにも密接に関係すると考えられることから、基礎科学的にも応用的にも注目されている。ところが、上記の研究から現在までの間、主に第一原理計算シミュレーションを含めた理論的研究が先行し、実験的研究としては金属単原子ワイヤーの寿命測定からその存在が間接的に示唆される程度に留まっている。加えて、理論的研究においても、電流誘起力が保存力か非保存力か、そのバイアス依存性など、特性について各研究グループ間で結論が異なっていたり、寿命測定から示唆される特性と矛盾することがある。これらの議論に終止符を打ち、電流誘起力に関する物理モデルの構築とその定式化を行うためには、電流誘起力を直接観測し、その特性を実験的に解明する必要がある。

マイクロ系の力学物性計測には、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いることが多い。しかしながら、金属単原子ワイヤーの研究に対しては、カンチレバーの剛性の低さ、金属試料表面や探針表面の清浄化の難しさが災いし、AFM の適用は困難である。そのような欠点を克服するための金属単原子ワイヤーの力学特性計測方法の一つとして、極低温ブレークジャンクション (MCBJ) 法に微小チューニングフォーク (以下、TF とする) を組み合わせた方法が報告されている。TF は、その共振周波数変化からフォークに付加された物体の剛性やフォークに働く力の勾配を検出できるだけでなく、pN オーダーの高感度力検出器として利用できることを示した報告がいくつかある。この感度であれば、報告されている電流誘起力のオーダーがサブ nN 程度なので、その測定には十分である。さらに、非接触型 AFM (nc-AFM) の分野で開発されている周波数変調法 (FM 法) を利用した共振子制御のための汎用デジタルデバイスを利用すれば、これまで報告されているアナログシステムと比較して、TF の共振安定性や共振周波数検出の精度と応答速度の向上が望まれる。しかしながら、TF によって検出される物性値の定量性について議論の余地があり、更なる改良が必要であった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、以下を検討することを目的とする。

- nc-AFM 装置においてカンチレバーの共振

周波数検出・制御に用いられる汎用デジタルデバイスを利用して、MCBJ 法に TF を組み合わせた金属単原子ワイヤーの力学・電気特性同時計測システムを構築する。

- MCBJ 法に組み合わせた TF によって計測される力学物性値を定量的に近似する理論モデルを明らかにする。
- 金属単原子ワイヤーにおいて生じる電流誘起力の直接観測を目指して力学・電気特性同時計測を行い、電流誘起力特性を実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

従来の MCBJ 法による単原子ワイヤー (単原子接点を含む) の電気伝導計測システムに、TF の共振周波数検出・制御のため、nc-AFM に用いられる汎用デジタル周波数検出・制御装置 (nanonis OC-4 station) を付加した。さらに、マルチプレクサー方式ではないリアル同時計測ボードを用いることにより TF の共振周波数シフト (Δf)、振動振幅 (ΔA)、単原子ワイヤーの電気伝導度 (G) を同時計測する装置を構築した。計測時に、TF の反共振によって共振周波数検出に誤作動が生じることがあったため、反共振を抑制するための電気回路を新たに付加し、必要に応じて計測前に図 1 のように共振だけが現れるように調整できるようにした。

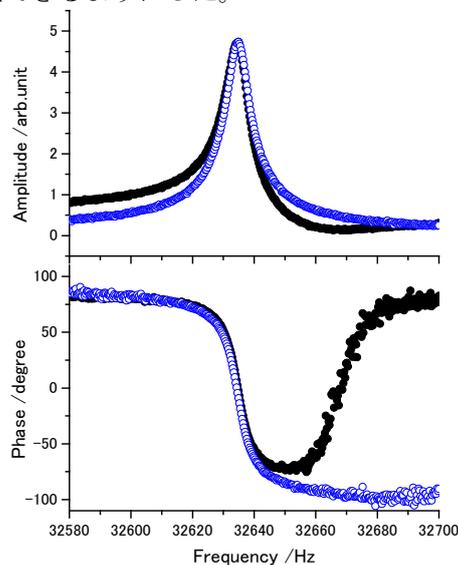


図 1 TF 共振曲線 (上: 振動振幅、下: 位相)
黒丸: 反共振抑制無し、青丸: 反共振抑制後

TF により計測される単原子ワイヤーの力学特性について定量的検討を行うために、構築した計測系を室温・大気中 AFM 装置に組み合わせ、いくつかのバネ定数 (Δk) を持つカンチレバーと図 2 のように TF を接触させ、TF の共振周波数変化 (Δf) を検出した。実験結果を定量的に近似できるモデルを検討す

るため、いくつかのモデルによる理論計算を行いそれらを相互比較した。

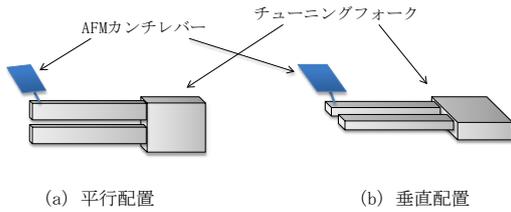


図2 カンチレバーのチューニングフォークへの接触方法

極低温下で Δf 、 ΔA 、 G の同時計測のため、直径0.1mmのAuワイヤーの中央付近にノッチを切ったサンプルを、エポキシ樹脂を用いてリン青銅基板上にTFと共に固定した。その基板を試料ホルダーに固定し、冷却後測定を行った。その際、バイアスを変化させることで、計測される力学特性のバイアス依存性について検討した。

4. 研究成果

バネ定数が Δk であるカンチレバーをTFのフォーク振動方向と平行に接触させたとき(図2a)、以下の4つの解析モデルに基づき、接触させるカンチレバーのバネ定数 Δk とTFの共振周波数シフト Δf の相関関係を導出した。

(i) 単振動:

$$\Delta k = 2k \frac{\Delta f}{f_0} \quad \begin{array}{l} f_0: \text{TF共振周波数}, \Delta f: \text{周波数シフト量} \\ k: \text{TFバネ定数}, \Delta k: \text{付加バネ定数} \end{array}$$

(ii) 弾性支持曲げ梁の横振動:

$$\Delta k = \frac{-\beta^3 (\cos \beta l \cdot \cosh \beta l + 1) EI}{\sin \beta l \cdot \cosh \beta l - \cos \beta l \cdot \sinh \beta l} \quad \beta^4 = \frac{\rho A}{EI} (2\pi f_0)^2$$

E: ヤング率
I: 断面2次モーメント
l: TFの長さ
 ρ : 密度
A: 断面積

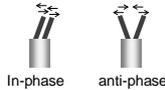


(iii) Weakly coupled oscillator:

$$\Delta k = 2k_{\text{eff}} \frac{\Delta f}{f_0} \quad k_{\text{eff}} \approx 2k$$

(iv) Two coupled oscillator:

$$\Delta k = 2k_{\text{eff}} \frac{\Delta f}{f_0} \quad k_{\text{eff}} \approx 2k \left(\frac{f_0^{\text{anti}}}{f_0^{\text{in}}} \right)^2$$



次に、 Δk が0.9N/m、11N/m、42.5N/mであるカンチレバーを室温・大気中AFMを用いてTFのフォークに接触させ、TFの共振周波数シフト Δf を測定した。測定結果(●)を理論解析結果と共に図3に示す。従来、TFを用いた計測の解析には、単振動モデルが多く用いられてきた。しかしながら、図3に示されるように、単振動モデルに基づいて計測された Δf から Δk を算出した場合、 Δk は過小評価される。本研究で検討したモデルの中では、Castellanos-Gomezらによって提案された

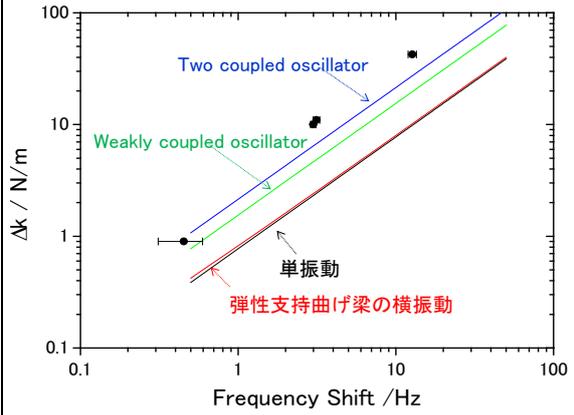


図3 Δk と Δf の相関関係

Two coupled oscillatorモデルが実験結果を定量的に近似することが分かる。実際、両モデルを比較した場合、同じ Δf から算出された Δk は2.8倍の差があった。このように、TFのフォーク振動方向と平行に単原子ワイヤーを形成させるときの力学特性解析モデルとしては、Two coupled oscillatorモデルが定量的に良く実験結果を近似することが分かった。TFのフォーク振動方向とカンチレバーを垂直に接触させて(図2b)同様の計測を行い、 Δk もしくは作用力の変化に対して Δf の変化を確認したが、それらの相関関係を定量的に近似できるモデルが得られず、今後の検討課題である。

TFを組み合わせたMCBJ法を用いて、極低温下でAuサンプルワイヤーの破断と接合を一定速度で300回繰返し、破断過程に現れた電気伝導度のヒストグラムを図4に示す。計測時のバイアス電圧は10mVであった。横軸は、量子化コンダクタンス単位($2e^2/h = G_0$)である。図のように $1G_0$ 付近にピークが見られた。Au単原子ワイヤー(単原子接点を含む)の電気伝導度がほぼ $1G_0$ であることから、TFに固定されたサンプルワイヤーにおいても、破断直前に清浄なAuの単原子ワイヤーが形成されていることが確認できる。

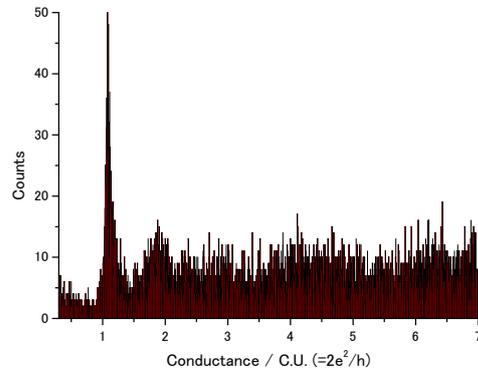


図4 伝導度ヒストグラム(Auサンプル)

次に、Auサンプルワイヤーが完全に破断した状態でTFの共振曲線を計測し、その後サン

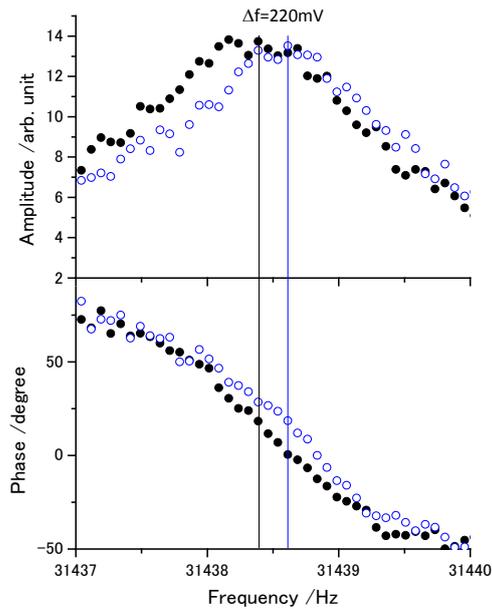


図5 単原子接点形成によるTF共振周波数変化

プルを最接合して電気伝導度を $1G_0 \sim 2G_0$ 付近に固定してTF共振曲線を計測して比較した。図5に計測結果（上：振動振幅、下：位相）を示す。黒丸と白抜き青丸は、それぞれサンプル破断時と電気伝導度が $1G_0 \sim 2G_0$ の計測結果である。破断時の共振周波数は31438.4Hz、Q値は18000程度であった。それに対し、電気伝導度が $1G_0 \sim 2G_0$ のときには、共振周波数が約220mHz高周波数側にシフトした。同様の計測をサンプルバイアスを100mVに変化させて行った。10mVバイアス時と同様にTF共振周波数の高周波側へのシフトを観測したが、明確なバイアス依存性は見られなかった。

今後は、本研究で構築した実験装置と得られた知見に基づき、電流誘起力に関する研究を更に進めると共に、金属単原子ワイヤーに関する他の力学特性研究への水平展開を目指す。

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0件）

〔学会発表〕（計1件）

- ① 塩田忠、櫻井修、篠崎和夫、「金属原子サイズ接点の力学特性計測」、日本物理学会第68回年次大会、2013.3.26、広島大学（広島）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩田 忠 (Shiota Tadashi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40343165