

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2006～2010

課題番号：18106003

研究課題名（和文） 高い秩序度を有する金属ナノマテリアルの創製と展開

研究課題名（英文） Formation of Metallic Nanomaterials by Controlled Atomic Accumulation and Their Characterizations

研究代表者

坂 真澄（SAKA MASUMI）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20158918

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：金属ナノマテリアル、原子拡散、原子集約、原子再配列、高い秩序度

1. 研究計画の概要

本研究は、原子拡散と再配列の現象を論理的に取り扱い、これを制御する科学基盤を確立し、これまでに実現されていない秩序度の高い金属ナノマテリアルの創製を実現すると共に、その物理的特性を正確に把握することで創製したナノマテリアルの展開・応用を図るものである。高密度電子流を駆動力として、原子を拡散させ、拡散した原子を意図した特定箇所に局所的に集約して高い圧縮応力を発生させ、圧縮応力を急激に解放することに伴って原子を排出して再配列させるという独自の発想に基づく原子制御の科学基盤を構築する。

5年継続により、（1）原子拡散と再配列制御の理論的考察、（2）各種金属ナノマテリアルの創製、（3）機械的・電氣的・磁気的特性評価、（4）ナノマテリアルの展開・応用、（5）ナノマテリアル創製指針の策定と量産技術化、なる5項目の研究を推進し、従来にない洗練された金属ナノマテリアル創製法の基盤確立とその展開・応用を目指す。

2. 研究の進捗状況

（1）原子拡散と再配列制御の理論的考察

拡散の振動数項、温度、活性化エネルギー、保護膜の物性と寸法等のナノ材料創製のための最適条件を理論的に抽出すべく、エレクトロマイグレーションによる原子流束発散に着目したナノストラクチャー創製の数値シミュレーション手法を世界に先駆けて構築した。ナノワイヤ創製のための支配因子を明らかにすると共に、高効率なナノストラクチャー創製のための試験片形状等を見出すことに成功している。

（2）各種金属ナノマテリアルの創製

アノード端にスリットを入れた SiO_2 被覆型の Al 薄膜配線を作製して拡散させた Al 原子を局所的に集約することで、高アスペクト比の Al ナノワイヤを創製することに成功した。また、当該ナノワイヤが連続的に成長することをその場観察により確認することにも成功した。これらの実験事実は、（1）に記載した数値シミュレーション結果の妥当性を裏付けるものである。さらに、アノード端の温度を変化させて微小孔より Al 原子を制御して排出することで、ナノワイヤ、マイクロボールを高い秩序度で選択的に作製できることを世界に先駆けて見出している。

（3）機械的・電氣的・磁気的特性評価

機械的特性評価に関して、100nN 分解能の極微小力センサを試作すると共に、負荷実験により得たナノワイヤの変形挙動を数値解析により再現することで、同ワイヤの弾塑性特性を評価することに成功した。また、光学顕微鏡下で行えるナノワイヤの機械的特性試験法を開発し、直径 100nm 以下の CuO ナノワイヤの縦弾性係数と強度の直径依存性を明らかにしている。電氣的特性評価では4探針型原子間力顕微鏡法、渦電流顕微鏡法、およびナノ構造 GaAs マイクロ波プローブを用いるマイクロ波原子間力顕微鏡法を開発した。また、通電下にある金属マイクロコイルと永久磁石との電磁氣的相互作用による、コイルの磁気的特性評価にも成功した。

（4）ナノマテリアルの展開・応用

ジュール熱を利用した金属ナノワイヤの接合、切断手法を世界に先駆けて提案した。

金属ナノワイヤの接触部における溶融現象を走査電子顕微鏡で捉えることに成功すると共に、同現象を支配するパラメータの特定に成功した。これまでに、本接手法を利用した上で Pt ナノワイヤに局所的な塑性変形を誘起し、電極チップ上に片持ち支持したマイクロリング構造を実現することで、ナノワイヤにアクチュエーション機能を付与することに成功している。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

上記2で記載のとおり、計画した項目を順調に実施できている。加えて、ストレスマイグレーションなる当初計画していなかった原子拡散現象によっても金属ナノ材料が創製できることを見出している。本研究で主に扱うエレクトロマイグレーションが高密度電子流を駆動力とするのに対し、ストレスマイグレーションは静水圧の勾配を駆動力とする。駆動力の異なる原子拡散現象を本研究に取り入れたことで、より多種類の元素の金属ナノマテリアルを創製、活用できることとなった。一例として、ストレスマイグレーションを利用して Ag ナノワイヤ、および Ag ヒロック (球形、三角形) の創製に成功している。また、両原子拡散現象を比較することで、当初計画より統一的で洗練された原子拡散の科学基盤が構築できつつある状況にある。また、ナノ接合、切断手法を世界に先駆け提案し、これを本研究において金属ナノマテリアルを高精度に操作する手段として活用することで、各種実験が円滑に遂行できている。さらに、残留ひずみの導入により Cu ナノワイヤをらせん状に曲げてナノコイルを作製する手法を提案し、世界最小となる金属被覆ナノコイル (素線径: 70nm, コイル径: 300nm) を実現する等、当初計画で期待した以上の成果が出てきている。

4. 今後の研究の推進方策

予定している金属ナノチューブを利用した流体センサ、および微小力センサを実現する。さらに、産業化に向け、各種金属ナノマテリアルの量産技術の開発に力を入れる。具体的に、これまで基本として配線形状の試験体を扱ってきたが、量産化のためこれを2次元に拡張した円板状試験体等を導入する。同試験体の中心から最適な半径の円周上に溝を設け、試験体の外周上から電流を入力して中心から出力することで、溝縁に原子を蓄積させる。同箇所の保護膜厚さの調整を踏まえナノマテリアルが多数生成できると考えている。さらに、開発した各種ナノ材料特性評価手法を高度化し、ナノサイエンス分野における重要ツールとしての確立を目指す。

5. 代表的な研究成果

(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25件)

- (1) K. Sasagawa, A. Kiritani, S. Fukushi, M. Saka, Simulation of nanostructure production by electromigration considering specimen's shape, J. Nanosci. Nanotechnol., 査読有, 9 (2009), 印刷中.
- (2) H. Tohmyoh, A governing parameter for the melting phenomenon at nanocontacts by Joule heating and its application to joining together two thin metallic wires, J. Appl. Phys., 査読有, 105 (2009), pp.014907-1-014907-9.
- (3) M. Saka, K. Kato, H. Tohmyoh, Y. Sun, Controlling electromigration to selectively form thin metal wires and metal microspheres, J. Mater. Res., 査読有, 23 (2008), pp.3122-3128.
- (4) M. Muraoka, N. Settsu, M. Saka, Residual-strain-induced nanocoils of metallic nanowires, J. Nanosci. Nanotechnol., 査読有, 8 (2008), pp.439-442.
- (5) B.-F. Ju, Y. Ju, M. Saka, Quantitative measurement of submicrometre electrical conductivity, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, 40 (2007), pp.7467-7470.
- (6) M. Saka, F. Yamaya, H. Tohmyoh, Rapid and mass growth of stress-induced nanowhiskers on the surfaces of evaporated polycrystalline Cu films, Scripta Mater., 査読有, 56 (2007), pp.1031-1034.

[学会発表] (計50件)

- (1) M. Saka, H. Tohmyoh, M. Muraoka, Y. Ju, K. Sasagawa, Formation of metallic micro/nanomaterials by utilizing migration phenomena and enhancement of their functions, IFAMST 2008, June 12, 2008, Hong Kong, China, 基調講演.

[産業財産権]

○出願状況 (計7件)

○取得状況 (計4件)

名称: 原子の拡散を制御することによる金属ナノワイヤの製造方法およびこの方法により製造する金属ナノワイヤ

発明者: 坂真澄, 長谷川昌孝, 上田亮介

権利者: 国立大学法人東北大学

番号: 特許第 4257429 号

取得年月日: 2009年2月13日

国内外の別: 国内

[その他]

<http://king.mech.tohoku.ac.jp/saka/index.htm>