

「極限環境状態における現象」
平成9年度採択研究代表者

藤田 博之

(東京大学生産技術研究所 教授)

「局所高電界場における極限物理現象の可視化観測と制御」

1. 研究実施の概要

真空トンネルギャップ中には、原子サイズの局所領域に大きな電界・電流・電磁場・電子相互作用が集中し、様々な動的原子・電子過程、励起・緩和過程、局所化学過程が発現する。本研究は、電界 10^7 V/cm、電流密度 10^8 A/cm²、という極限的状况下における単一原子・分子の振舞いを可視化観察し、その物理特性の解明や制御を行うことが目的である。これを達成するため、大きく分けて3つの柱を建てて研究を進めている。まずマイクロマシングループでは、半導体マイクロマシン技術により高性能・高機能の1チップマイクロマシン STM を実現する。わずか0.5mm角程度の大きさのデバイスで、トンネルギャップを0.1nmの精度で動かし、原子オーダーの現象や電界を制御する。第2の可視化グループでは超高分解能電子顕微鏡を製作し、単一原子の可視化を目指す。電子銃から出る位相のそろった電子ビームを2つに分け、一方は試料（トンネルギャップ）を通し、もう一方は参照ビームとしてそのまま進行させる。両者の電子波の干渉測定により試料を通過した電子ビームの位相の変化を検出し画像を得る。電子ビームをマイクロSTMのトンネルギャップ中に通すことにより、ギャップ中の原子・分子の位置や電界分布を可視化する手法を確立する。第3の理論解析グループでは、局在する高電界場中での原子や分子の振る舞いを第一原理に基づく理論により解析する。最終的には、実験と理論解析の結果を対比することで、STMにおけるトンネル現象の精密で実証的な描像を確立し、局所高電界場における極限物理現象を原子レベルで理解することをめざしている。

2. 研究実施内容

2.1 マイクロマシングループ研究実施内容

マイクロマシングループでは、半導体マイクロマシン技術により高性能・高機能の1チップマイクロマシン STM を実現することを目的としている。今年度は、まず局所高電界の観測ツールとして、ナノメートルオーダーの断面寸法を有するFree-standing 単結晶 Si ワイヤ構造を作製する技術を開発した。図1に作製し

た Si ナノワイヤーの走査型電子顕微鏡(SEM)写真を示す。写真は、基板の裏面から観測したものである。ナノワイヤーの断面形状は二等辺三角形をしており、幅は約 55nm、高さは約 39nm である。観察透過型電子顕微鏡(TEM)で観察を可能にするため、基板を貫通するスルーホールが設けられている。また、基板上部には電界シールドのための金属層が形成されている。図 2 に単結晶 Si ナノワイヤーの作製原理を示す。基板としては、SOI(Silicon On Insulator)層の厚さが 60nm である SIMOX(Separated by IMplanted OXYgen)基板を利用した。まず図 2 (1)に示すように SiN 層を<110>方向に沿ってパターニングした後、TMAH 水溶液によって SOI 層を異方性エッチングして(111)面を形成する。局所酸化により(111)面に選択的に酸化膜を形成した後(図 2 (2))、SiN 膜を除去する(図 2 (3))。そして異方性エッチングをもう一度行うことによって、図 2 (4)に示すように 2つの(111)を側面としたワイヤー構造が作製される。本プロセスでは、ワイヤーの断面は原理的に SOI 層の厚さのみで決定され、リソグラフィの精度には全く依存しない。

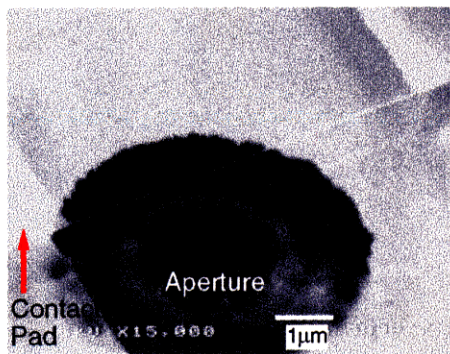


図 1 作製したSiナノワイヤーのSTM

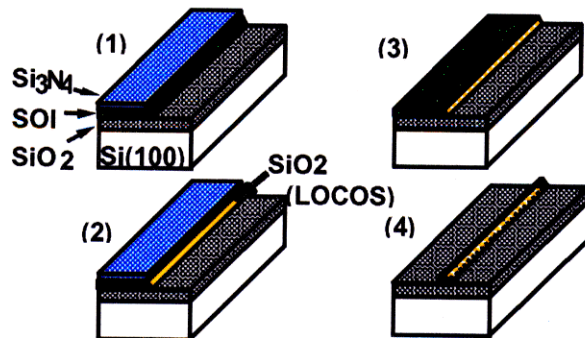


図 2 Siナノワイヤーのプロセス図

図 3 に作製した Si ナノワイヤーの TEM 写真を示す。図中の挿入写真は Si ナノワイヤーの格子イメージである。IV 測定と TEM 観察を同時に行うことにも成功した。図 4 は、対向した 2つの Si ナノワイヤーが、電界により移動する様子を示す。最初は残留応力によりお互いずれて配置しているが、電圧を印加すると互いに引き合っって一直線に並ぶのが観測される。図 4 では両ワイヤー間に 90V の電位差を与えたとき、完全にまっすぐに配列した。以上より、作製した Si ナノワイヤーが局所高電界の観測に利用可能であることが示された。

次に、透過型電子顕微鏡内で動作するトンネル電流制御機構をマイクロマシンングで製作した。特に、1対の探針を自己整合プロセスで製作し、ティップ半径数十ナノメートル、初期ギャップ100ナノメートル程度を安定して得ることができた。また、トンネルギャップを安定に制御する新しい駆動機構を開発した(図 5、図 6)。従来の櫛歯型静電アクチュエータの位置決め精度が駆動電圧の精度に依存するのに対し、今回開発した機構は、Nビットのデジタル変位入力を準アナログ変位出力に

変換するものであり、駆動電圧の揺らぎ等に依存しないことが特徴である。

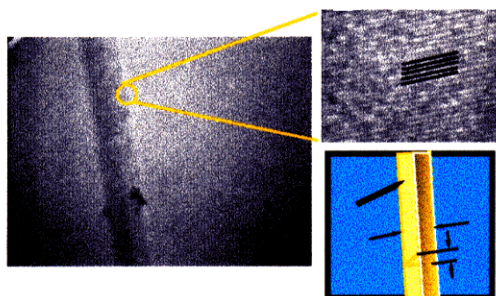


図3 作製したSiナノワイヤーのTEM
(右上の図は格子像、右下は模式図)

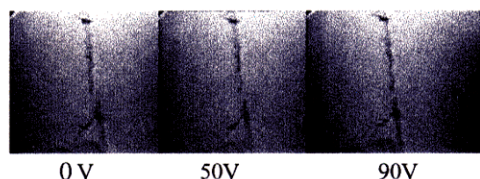


図4 対向したSiナノワイヤーが電界により移動する様子 (TEM像)

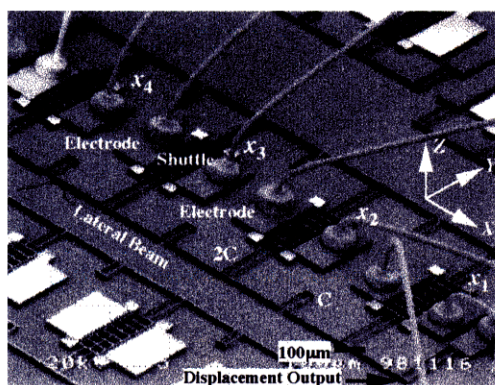


図5 MEMDACのSEM写真

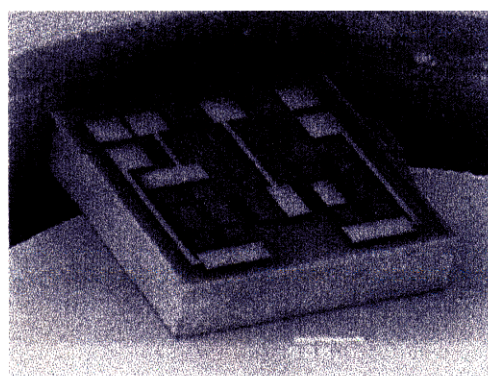


図6 透過型電子顕微鏡内で動作する
トンネル電流制御機構

2.2 可視化グループ研究実施内容

2.2.1 位相解析ソフトウェアの開発

干渉計のキャリブレーションを行い、干渉条件を $1/N$ 波長ずつずらした N 枚の干渉図形を TV カメラを通して干渉計から取り込み、位相分布を計算して結果を表示し、必要に応じてファイルに格納する基本的なソフトウェアを開発した。さらに、計算画像に加えて、ファイルから読み込んだ任意の画像データ・数値データについても、画像、任意の1ラインの位相（あるいは濃淡）プロファイル、任意の感度に位相を増幅した等高線像、任意の2データ間の差分像などの表示機能、画像のプリントアウト機能、計算機でシミュレートした干渉図形を作成する機能などを付け加え、干渉図形の取込から複数の位相解析データの比較検討までほとんどの処理を同じソフトウェア上で行えるように高機能化を達成した。この結果、コンピュータ言語や位相解析法に不案内な研究者でも、対話形式で一連の操作を円滑に行うことができるようになった。

2.2.2 超高真空・高分解能位相解析電子顕微鏡の開発

本研究において電子顕微鏡に要求される仕様を詳細に検討して、顕微鏡本体の製

作を開始するとともに、最重要パーツの1つである微動型電子干渉計のプロトタイプ
の設計・製作とこれを用いた電子干渉実験を行い、電子顕微鏡および微動型電子
干渉計の細部構造や使用条件に関する基礎データを取得した。また、多プローブ試
料ホルダの設計・製作に関して詳細な検討を行い、基本的な構造を決定した。この
試料ホルダおよび干渉計の開発にはまだ困難が予想されるが、電子顕微鏡が完成す
る平成12年2月まで技術課題が解決できる見通しが得られた。

2.2.3 レーザ干渉計を用いた干渉計測基礎実験

可視化グループの一方の研究実施場所である東京工芸大学と共同で、電子干渉計
と同構成の複プリズムを用いたレーザ干渉計を構築した。この干渉方式はレーザ光
学分野では例がないもので、コンパクトでかつ振動・空気の揺動に強いという特徴
を有しており、電子干渉計測の高精度化のためのモデル実験の位置づけにとどまら
ず、新しいレーザ干渉計としても有望である。

この干渉計と上記位相解析ソフトウェアと組み合わせて、穀物のデンプンなどの
粉体をサンプルとした干渉計測の基礎実験を行い、測定誤差の成因と除去・補正方
法の研究を進めた。この結果、測定ノイズの主要因は、複プリズムによるフレネル
縞、位相シフト誤差、ピクセルごとのショットノイズの3種類で、最大1/10波
長程度の測定誤差を与えていることが明らかになった。一部の誤差についてはすで
に補正の有効性を確認し、peak-to-peak 値で1/30波長、RMS で1/200波
長程度の精度レベルを達成した。目標とする1/50波長オーダーの位相変化の観
察・計測が可能であるか否かは、画像上でのノイズの空間周波数分布に依存するの
で単純には論じられないが、他の成因による誤差についても除去・補正するおよそ
の見通しが得られているので、目標を達成できる可能性は十分高いと考えられる。

2.3 理論グループ研究実施内容

2.3.1 表面原子の挙動解析の予備検討

局所高電界場中における表面原子の挙動を理解するための予備検討として、水素
終端シリコン表面上の未結合ボンド周辺での吸着アルミニウム原子の振る舞いを第
一原理計算によって検討した。この系では、未結合ボンドと吸着原子間に安定な化
学結合ができ、吸着原子の位置が固定されてしまうと予想される。しかし、計算の
結果、確かに安定な化学結合が形成されるが、吸着原子位置は固定されてしまうの
ではなく、未結合ボンドを持つシリコン原子の周囲のかなり広い領域を動きうる事
を見出した。

2.3.2 局所高電界場中での電子状態計算手法

局所高電界場中での電子状態を計算で信頼性高く予測するためには、通常の電子
状態計算法とは異なる計算方法を工夫することが不可欠である。このための方法論
はすでに1, 2提案されてはいるが、我々は、電極領域と対象領域との境界条件の

取り方を工夫することにより、従来法より簡明でかつ同等の信頼性が期待できる計算方法を考案した。この方法に基づく数値計算プログラムの開発を現在進めている。

2.3.3 カーボンナノチューブの電子状態計算

平成10年度は、カーボンナノチューブが強電界に曝された場合の電子状態と局所電界分布を、密度汎関数を基礎にした第一原理電子論によって決定した。カーボンナノチューブは、グラファイト層を丸めて筒状にした構造であるが、その丸め方によっていろいろな形、原子の幾何学的配置をとり、それに伴い電気伝導特性も半導体から金属へと変化する。本研究では、形・電子状態・電気伝導特性の異なるナノチューブが外部強電界にどのように応答し、どのようなナノチューブが電界電子源に適しているかを探る目的で大規模規模計算を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) ナノチューブ先端部分の局所電界強度は、先端原子が大きく突出したジグザグ型の構造をもった細長いナノチューブにおいて顕著である。
- 2) 電界がナノチューブ内部から排除される遮蔽効果は、電子状態スペクトルにギャップがないか小さいナノチューブに現れる。
- 3) ナノチューブ先端に局在する不対結合状態は、外部電界に最も敏感に反応し、電界電子放出機構にも重要な役割を果たすことが想像される。

3. 主な研究成果の発表（発表論文）

- 藤田博之, "新しいマイクロアクチュエータ", 電気学会誌, Vol. 118, pp.364-365, 電気学会, 1998. 6
 - H. Fujita, "Microactuators and Micromachines," PROCEEDINGS OF THE IEEE, Vol.86, No. 8, pp.1721-1732, IEEE, 1998. 8
 - 藤田博之, "ナノの世界を開くマイクロマシン", 学術月報, Vol. 51, No. 7, pp. 704(42)-709(47), 日本学術振興会, 1998. 7
 - H. Fujita, H. Toshiyoshi, "Micro actuators and their applications," Microelectronics Journal, Vol. 29, No. 9, pp. 637-640, Elsevier Science Ltd, 1998. 8
 - H. Fujita, "Micromachines," INDUSTRIAL ELECTRONICS HAND BOOK, Chapter115(pp.1472), CRC PRESS(Editor J.DAVID IRWIN), 1998. 4
- 他7件