

「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」

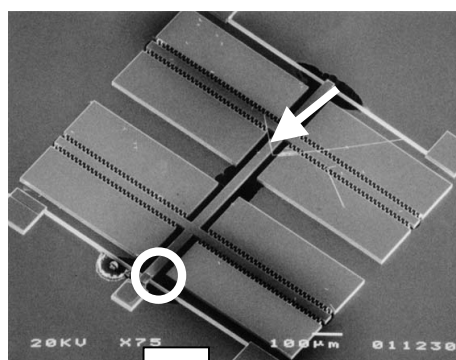
1. 研究実施の概要

本研究は、マイクロマシニング技術で走査トンネル顕微鏡 (STM) やナノ寸法のプローブを作り、それらを位相差検出透過電子顕微鏡内で動作させることにより、トンネルギャップ中や電界放出電子銃先端の局所的高電界場における極限物理現象および、ナノ量子構造中の電子伝導を可視化観測と同時に測定することを目的としている。今年度は、数 nm 程度に尖った鋭いシリコン探針をマイクロアクチュエータと一体化して作るプロセスを確立し、トンネル電流制御デバイスと電界放出電子銃に適用した。前者については、市販の STM 装置と組み合わせ、トンネル電流検出に使用できることを確認した。また、後者について位相差検出透過電子顕微鏡内で動作特性を測り、一つの針から数 mA もの大きな電流が放出されることや、過大電流による針先端の破壊過程の実時間観察など興味ある知見を得た。位相差検出手法を光学顕微鏡に応用し、0.00005 の屈折率差まで画像化されることに成功した。理論計算面では、ナノ電子銃の大電流放電機構の理論解析を進める一方、アルミニウム表面上の原子サイズ突起からの電子放出特性とサイズの関係、グラファイトシート端からの電子放出の表面局在電子状態依存性、銀吸着シリコン表面の STM 像の理論的解釈などについて新しい知見を得た。

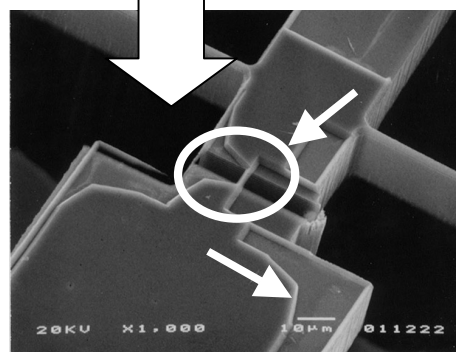
2. 研究実施内容

* マイクロマシニンググループ

透過型電子顕微鏡 (TEM) 内でプローブギャップを連続的に変化させることが可能なマイクロマシニンググループの対向ナノプローブを得るため、対向電子銃の作製プロセスにマイクロアクチュエータ作製プロセスを融合して、一体型のデバイスを設計・作製した。3 層の SOI 構造を利用してアクチュエータの駆動電圧に関係なくプローブ間に電圧を印加



Magnified view



できる構造とした。

3層のSOI基板を自作する際に、最上部層の構造をフリースタANDINGするための工夫を貼り合わせる基板に施すことにより、容易にマイクロアクチュエータを一体化することに成功した。そのプロセスにより、櫛型アクチュエータを一体化したシリコン細線構造を試作した。図1に試作したデバイス、また図2にシリコン細線部のSEM写真を示す。櫛型アクチュエータは2層目のSOI層に作製されており、シリコンワイヤー層と酸化膜で分離されている。また櫛型アクチュエータに代えて、熱膨張アクチュエータを一体化したデバイスも作製し、プローブ先端を10nm以下の精度で直線性良く動かす事ができた。

このプロセスを応用して作ったトンネルギャップ制御デバイスを上記電子顕微鏡中で動作させ、トンネル電流制御時のギャップ直視観察を試みた。この結果、ギャップを構成する対向した針先の高さが異なっているため、ギャップそのものが見えなかった。一方の針先を上下に動かし、高さを一定にする垂直櫛歯アクチュエータを設計・製作して動作を確認した。現在、これをトンネルデバイスに一体化するプロセスを進めている。

* 可視化グループ

可視化グループ:透過型位相シフト干渉顕微鏡

電子顕微鏡を用いたマイクロマシン試料の観察・計測を、マイクロマシングループと協力して行った。この結果については、マイクロマシングループの報告内容を参照されたい

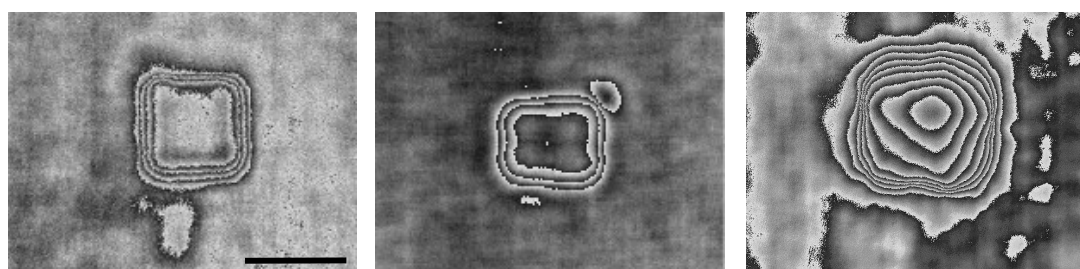
微小で透明な物体の位相情報は物理学や、材料科学などの基礎科学分野だけでなく、産業技術においても重要である。しかし、通常の透過型顕微鏡はその構造上から、位相シフト干渉法などの高精度干渉計測法の適用が困難で、位相物体の高精度・高分解能の計測が実現されていない。そこで、本グループでは、透過型電子/光学顕微鏡に配置した複プリズムを横移動させて位相シフトを導入し、一連の干渉パターンから被検の位相情報を高精度で迅速に検出システムの開発に成功した。今年度は、システムの高精度化及び光導波路屈折率分布の高精度計測に取り組んだ。

開発したシステムは透過型光学顕微鏡の結像系に鋭角 2° の屋根型プリズムを挿入したので、光源にはHe-Neレーザを用いた。光路の片側に配置した試料を透過した光と、試料のない側を通った光とは複プリズムによって互いに引き寄せられて観察面上で重なりあって干渉する。位相計測の際、複プリズムを横移動させて位相シフトを導入しながら干渉パターンを計算機に取り込み、被検の位相分布を高精度で算出する。複プリズム移動に伴う像移動や、検出面内の位相シフトの均一性などを解析し、それぞれ1千分の6ミクロン程度と1千分の1波長以下であるとの結果が得られた。さらに、位相シフト誤差や迷光の影響などを除去することで、 $\lambda/150$ (0.00005の屈折率に対応)以上の計測精度を達成した。

このシステムを用いて波長多重通信などの分野で重要な役割を果たしている光導波路の屈折率分布の計測を行った。実験に用いた試料はそれぞれゲルマニウムとチタン添加のもので、カバークラッドの処理温度はそれぞれ 800°C 、 900°C 及び 1200°C であった。断面内の屈折率分布を計測するために、導波路を厚さ $25\mu\text{m}$ 及び $120\mu\text{m}$ にスライスし、表面を研磨して計測した。測定結果をそれぞれ図1(a)、(b)及び(c)に示す。傾斜付き等高線は10分の1波長の位相変化に対応して

いる。実験結果から 800°C や 900°C の温度で処理した試料の場合はクラッド部からコア部への屈折率変化が急峻で、それに比べて 1200°C で処理したサンプルの場合は屈折率分布が緩やかになっていることが分かった。その主な原因はドーパントの熱拡散と考えられる。本手法は同じ原理の電子線干渉顕微鏡に適用できる。

実験で使用したサンプルは KDDI 研究所と日立電線(株)よりご提供いただいた。



(a)ゲルマニウム添加、800°Cで処理 (b)ゲルマニウム添加、900°Cで処理 (c)チタン添加、1200°Cで処理

図1. 光導波路の屈折率分布

* 理論解析グループ

理論グループでは次の三つの成果を得て、学会で発表した。

- (1) 開発済の半無限電極・定常電流を考慮した密度汎関数計算プログラムを用いてアルミニウム表面上の原子サイズ突起構造からの電界電子放射現象を引き続き解析した結果、これまで謎であった放出電子のエネルギー分布に関する実験の不一致の原因が突起サイズの違いから説明できることを明らかにし、論文発表した。また、プログラムを 2 電極系に拡張して電極間アルミニウム原子鎖の電気特性を計算した結果、3 原子鎖と 4・5 原子鎖の高バイアス電圧領域での振舞いに顕著な違いが見られることを見出し、現在論文にまとめている。さらに、各原子に働く力を計算する機能をプログラムに付加した。これを利用した予備計算を現在進めている。
- (2) 前年度から行ってきた時間依存密度汎関数法プログラム開発を完了し、これを用いてグラファイトシート端からの電子放射現象を理論解析した。その結果、共有結合性の強い元素から構成される表面からの放射電流値が仕事関数の大きさだけでなく表面局在電子状態の特徴に大きく左右されるという、従来の現象論では説明不可能な重要な知見を得た。また、計算結果は 1 本のカーボンナノチューブから放射される電流の最大値が約 $1\mu\text{A}$ であることを示し、これは実験結果を再現する。以上の成果をまとめた論文は最近出版された。現在は、シリコンクラスター、BN シート、ダイヤモンド表面など、他の系からの電界放射機構についても解析を進めている。
- (3) 昨年度に引き続きゼロ電場中の銀吸着シリコン表面における表面原子挙動と実験データとの関連について検討を進めた結果、STM で鮮明に観測される低温での位相境界像も大きな構造揺らぎの平均像であることを見出すなどの興味深い知見を得、論文発表した(一部は既に出版された)。

以上の他、マイクロマシングループで行われているナノプローブからの電界電子放射実験で興味深い結果が得られていることをうけ、理論グループでもこの実験に関する理論解析を現在

進めている。

3. 研究実施体制

(1) マイクロマシングループ

- ① 研究分担グループ長名
藤田博之(東京大学生産技術研究所・教授)
- ② 研究項目
高性能マイクロマシンSTMの設計と試作
高性能マイクロマシンSTMの製作プロセスの検討

(2) 可視化グループ

- ① 研究分担グループ長名
遠藤潤二(日立製作所 基礎研究所・主任研究員)、陳軍(東京工芸大学・助教授)
- ② 研究項目
位相解析顕微鏡法による高真空超高分解能電子顕微鏡の試作開始
位相解析アルゴリズムの開発と電場や微細構造の三次元観察用アルゴリズムの検討
針状試料先端の電場や微細構造の観察

(3) 理論解析グループ

- ① 研究分担グループ長名
渡邊聡(東京大学大学院工学系研究科・助教授)、渡辺一之(東京理科大学・助教授)
- ② 研究項目
局所高電界場中極限物理現象の理論解析の計算プログラム開発
種々の原子スケール構造物の局所電界強度分布の決定
種々の原子スケール構造物の構造と電子状態の計算

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- 藤田博之,「第2部ー16 ナノ電気機械システム」, ナノテクノロジー最前線, p177-194, (株)東京教育情報センター, 2002.3
- 藤田博之, 橋口原,「ナノ加工のためのエッチング技術」, 図解ナノテクノロジーのすべて第3章ナノテクノロジーのための加工・計測, p74-77, 工業調査会, 2001.11
- Hiroyuki Fujita, Hiroshi Toshiyoshi, Gen Hashiguchi, Yasuo Wada, "Micromachined tools for nano technology," Riken Review No.36, Focused on Science and Technology in Micro/Nano Scale, pp.12-15 The Institute of Physical and Chemical Research, 2001.6
- Y. Wada , "Prospects for Single Molecule Information Processing Devices," Proc. IEEE, 89(8), 1147 (2001).
- Y. Wada , "Prospects for Molecular Electronic Devices (invited)," Current Applied Physics, 1, 28 (2001).

- 和田, 山田, 松重, 「分子ナノエレクトロニクスの展望(招待論文)」, 応用物理 70(12), 1395 (2001).
- J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada and H. Fujita, “Transmission laser microscope using the phase-shifting technique and its application to measurement of optical waveguides,” Applied Optics OT Vol.41 (2002) 1308-1314
- J. Chen, Junji Endo, Yoshiaki Niino, and Hiroyuki Fujita, “Phase shifting interference microscopy using a Fresnel’s biprism,” Proc. of SPIE, Vol. 4116, pp.158-161 (2001).
- S.Itoh, T. Yamazaki, K. Katoh, and J. Chen, “High Precision Testing Method for Fabry-Perot Etalon”, Optical Review Vol. 8, No. 3, pp. 179-183 (2001)
- Y. Gohda and S. Watanabe, “Total energy distribution of field-emitted electrons from Al(100) surface with single-atom terminated protrusion,” Physical Review Letters, 87 (2001) pp. 177601-1-177601-4.
- Y. Gohda, Y. Nakamura, K. Watanabe and S. Watanabe, “Density functional analysis of field emission from metals,” Materials Science and Engineering A, 327 (2002) pp. 1-6.
- Y. Nakamura, Y. Kondo, J. Nakamura, and S. Watanabe, “Theoretical study on the structural phase transition of Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag surface,” Surface Science, 493 (2001) pp. 206-213.
- Y. Nakamura, Y. Kondo, J. Nakamura, and S. Watanabe, “STM images apparently corresponding to a stable structure: Considerable fluctuation of a phase boundary of the Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Ag surface,” Physical Review Letters, 87 (2001) pp. 156102-1-156102-4.
- N. Sasaki, S. Watanabe, H. Aizawa, and M. Tsukada, “Simulation of interaction force between Si tip and Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag surface of IET structure in noncontact AFM,” Surface Science, 493 (2001) pp. 188-193.
- N. Sasaki, S. Watanabe, H. Aizawa, and M. Tsukada, “Visualization of thermally fluctuating surface structure in noncontact atomic-force microscopy and tip effects on fluctuation: Theoretical study of the Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Ag surface,” Physical Review Letters, 88 (2002) pp. 046106-1-046106-4.
- K. Tada, S. Furuya and K. Watanabe, “Ab Initio Study of Hydrogen Adsorption to Single-Walled Carbon Nanotubes,” Physical Review B, 63 (2001) pp. 155405-1-155405-4.
- K. Tada and K. Watanabe, “Ab Initio Study of Field Emission from Graphitic Ribbons,” Physical Review Letters, 88 (2002) pp. 127601-1-127601-4.

(2) 特許出願

発 明 者:遠藤潤二、陳 軍

発明の名称:試料観察計測用可干渉ビーム装置

出 願 日:特願 2001-234878(出願日 2001.8.2)

国内出願 1件