

「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、太さ100nmのツインナノプローブ、先端曲率数nmの電界放出電子銃などを作製し、位相差検出透過電子顕微鏡内での基本動作を確認した。また、局所的高電界場における極限物理現象についての第一原理計算手法を開発した。原子サイズの突起構造を考え、この突起からの電界電子放出現象を計算により解析し、興味ある知見を得た。また、カーボンナノチューブ (CNT) からのカーボンクラスター電界蒸発現象の解析にも成功した。

2. 研究実施内容(研究目的、方法、結論などをご記入下さい。公開を考えています。)

1. マイクロマシニング研究グループ

マイクロマシニンググループでは、次の二つの成果を得た。これについて特許を出願すると同時に、学会で発表し、論文にまとめて投稿した。

(1) シリコンマイクロマシニング技術を利用して、10~100nm程度の寸法領域で電気伝導を測定するツールを2種類開発した。これらのツールは透過型電子顕微鏡内で可視化観測しながら動作させ、最終的にはナノ構造物の電氣的測定を行うことが目的である。また、製法は一括加工を用いており、再現性良く、正確な微細構造を作ることが出来る。

「ツインナノプローブデバイス」は、シリコンの結晶方位面を利用することで、初期ギャップが500nm以下のプローブを2本有するデバイスである。プローブの太さは、200nmであるが、これはシリコンの厚さに依存する物である。各プローブにマイクロアクチュエータを組み込み、それぞれのプローブを独立に動かしギャップの間隔を数nm単位で狭めていくことができる。

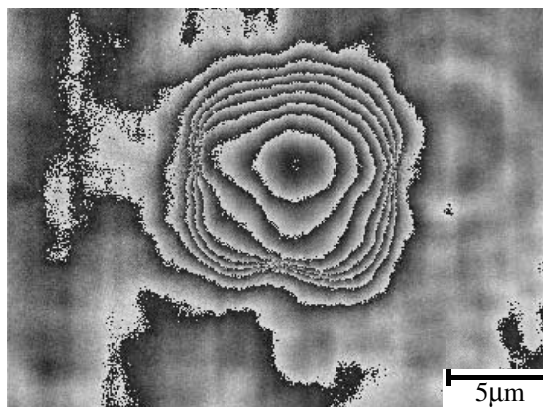
「対向するシリコンナノギャップ制御デバイス」は、シリコンの結晶方位面と低温でのドライ酸化による先端の先鋭化処理を用いて製作した。数nmの先端

曲率半径を持つプローブが、2本対向している。両者の間隔は、100nm程度であり、ナノサイズの物質をその間に挟んで伝導特性を測定することを最終目的としている。今年度は、デバイスの作製方法の確立と、ギャップ間に流れる電界放出電子電流の測定を行った。また、プローブ先端にカーボンナノチューブを選択成長できることも確かめた。

- (2) マイクロ加工したプローブで様々な試料の評価を行う場合、粗動機構により試料をプローブまである程度近づけ、それからプローブのマイクロアクチュエータでnmの微動調整を行う必要がある。このため、数十nmの位置分解能とmm級の可動範囲を持つ新しい静電マイクロアクチュエータを開発した。このアクチュエータは、バネで支えた重りを静電気で動かし、アクチュエータ本体に衝突させたときの衝撃力で、本体をステップ状に動かす物である。マイクロマシニング技術を利用してこのアクチュエータ（数ミリ角の大きさ）を作り、平均14nm程度のステップで駆動することに成功した。

2. 可視化研究グループ

透過型位相シフトレーザ干渉顕微鏡は、当初電子線のモデル実験として始めたものであるが、方式・計測対象に新規性が高く、また光デバイス等の計測に極めて有効であることが明らかとなったため、計測精度や像質の一層の向上と応用計測を進めた。図は、光導波路断面の屈折率分布を計測した例で、中央の矩形部分が導波路、右辺が基板、上下および左辺が導波路形成後に堆積させたクラッド層である。等高線は屈折率の分布を表しており、導波路中心部が最も屈折率が高い。等高線1間隔は0.03%の屈折率差に対応し、1間隔内の白-黒はその0.03%の間の値を濃淡で表示している。この計測では、1/100波長（RMS）以下の計測精度が得られており、サブミクロン領域の屈折率分布を初めて高精度に可視化することができた。この計測技術は、従来の位相差顕微鏡、干渉顕微鏡あるいは屈折率



光導波路断面の屈折率分布

計による計測とは一線を画するもので、光デバイスの計測に必須なものとなる可能性が高い。

また、新たな概念に基づく計算処理による誤差除去法の基礎実験を行い、1/90波長の精度を確認し、特許を出願した。この方法は広範囲な干渉計測法に応用可能であるが、特に電子干渉においては唯一の高精度化法で、電子干渉においても1/100波長の計測精度を達成できる見通しが得られた。前述したように、透過型位相シフトレーザ干渉顕微鏡は光デバイスの計測に極めて有効であり、2～3の光デバイスメーカーからも製品化の要望が寄せられている。このため、JSTの委託開発事業と独創的研究成果共同育成事業のいずれかの制度を活用して製品化するべく、開発予定会社を含めて精力的に検討を重ね、上記両事業に提案した。

3. 理論計算グループ

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) 前年度開発した、半無限電極への接続を考慮して定常電流下での電子の状態を自己無撞着に計算する方法論を、より現実的な系に適用することに成功した。まずジェリウム電極表面にアルミニウム5層を吸着させた系でアルミニウム表面の状態がよく記述できることを仕事関数の値を計算して確かめた後、この表面上に原子サイズの突起構造を考え、この突起からの電界電子放出現象を計算により解析した。その結果、電界や誘起電荷の突起先端への集中などの予想された現象が確認できただけでなく、放出電子のエネルギー分布などの点で大変興味深い結果が得られつつある。今後、さらに詳細に解析した上で論文にまとめる。
- (2) 強電界下にある複数電極の電子状態を解析するために前年度開発した空間分割密度汎関数法を、カーボンナノチューブ(CNT)からのカーボンクラスター電界蒸発現象の解析に応用した。電界電子放出の場合と逆向きの電界をCNTに印加すると特徴的な原子数 n からなるカーボンクラスターイオン C_n^+ がチューブ先端から蒸発してくる事が実験で観測されているのに対し、その理論的検討はまだ全くされていなかった。計算の結果、(i) C_5^+ が3V/Aの電界下で蒸発するための活性化エネルギー障壁が電界のない場合に比較し著しく減少していること、(ii) C_{20}^+ の安定構造は中性クラスターの安定構造(ボウル型)とは異なり、5員環12個のみで構成される最小フラレン構造になっている可能性が高いこと、が明らかになった。今後、吸着水素原子やCNTの幾何学的構造の影響についても調べた上で、論文にまとめる。
- (3) 表面原子の挙動を理解するための予備検討として、ゼロ電場中の銀吸着シリコン表面について、昨年度に引き続き第一原理計算に基づくモンテカルロ法によって検討を行った。その結果、安定な構造に対応していると従来考えられて

いたこの表面の走査トンネル顕微鏡像が、きわめて大きく構造が揺らいでいる状態の平均的な情報に対応することを明らかにし、論文にまとめて投稿した。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

H. Toshiyoshi, D. Kobayashi, M. Mita, G. Hashiguchi, H. Fujita, J. Endo, Y. Wada, "Microelectromechanical Digital-to-Analog Converter of Displacement for Step Motion Actuators," IEEE/ASME J. Microelectromech. Sys. vol. 9, June 2000, p.218-225.

和田恭雄, 「原子分子操作による新規素子の創製 (招待論文)」高分子 49(7), 435 (2000)

Y. Wada, M. Tsukada, K. Matsushige, M. Fujihira, T. Ogawa, M. Haga and S. Tanaka, "Prospects and Problems of Single Molecule Information Devices (invited)," Jpn. J. Appl. Phys., 39(7), 3835 (2000)

和田恭雄, 「未来を担う分子エレクトロニクス(招待論文)」化学 55(8), 26 (2000)
三田信, 三田吉郎, 年吉洋, 藤田博之, 「遅延マスク法によるシリコンの3次元バルクマイクロ構造」電気学会E部門誌, 5月号, p.310

M. Mita, Y. Mita, H. Toshiyoshi, T. Oba, H. Fujita, "Multi-height HARMS by planer photolithography on initial surface," Microsystem Technologies.

M. Mita, Y. Mita, H. Toshiyoshi, H. Fujita, "Multiple-height Microstructures Fabricated by ICP-RIE and Embedded Masking Layers," 電気学会E部門誌, 2000 Vol.120-E, pp.493-497

遠藤潤二, 和田恭雄, 藤田博之, 陳軍 「電子干渉計測によるナノ構造と電界分布の可視化の試み」電気学会論文誌E, 120巻6号285-291, 2000

Y. Gohda, Y. Nakamura, K. Watanabe and S. Watanabe, "Self-consistent density functional calculation of field emission currents from metals," Physical Review letters, 85 (2000) pp. 1750-1753.

S. Watanabe, Y. Kondo, Y. Nakamura and J. Nakamura, "Atomic and electronic structure of the $S(111) \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface reexamined using first-principles calculations," Science and Technology of Advanced Materials, 1 (2000) pp. 167-172.

K. Tada, K. Watanabe and C. Ishii, "Ab Initio Study of Clusters and Nanotubes in Electric Fields," Few-Body Systems Supplement 12 (2000) pp. 60-65.

N. Nakaoka, T. Tada, S. Watanabe, H. Fujita and K. Watanabe, "Partitioned Real-Space Density Functional Calculations of Bielectrode Systems under Bias Voltage and Electric Field," Physical Review Letters 86 (2001) pp. 540-543.