

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

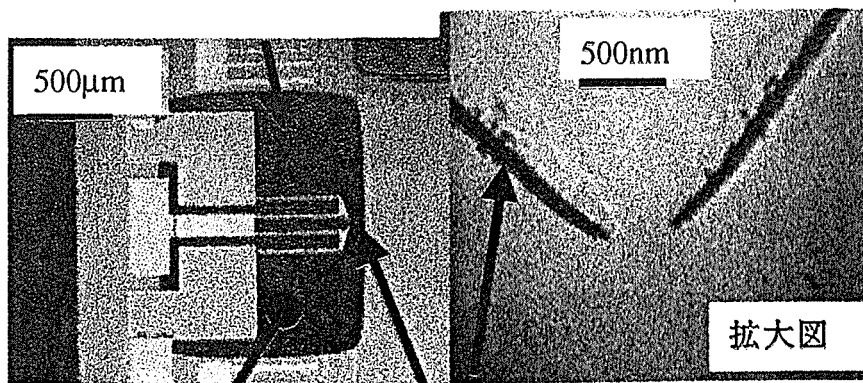
藤田博之（東京大学生産技術研究所・教授）

本研究の目的は、真空トンネル電流の流れるギャップに代表される、原子オーダーで局在した高電界場やナノ構造中での、原子移動や電子伝導を可視化観測することである。このため、(1) マイクロマシン応用ナノ探査ツール、(2) 位相差検出による超高分解能顕微鏡、(3) 第一原理に基づく理論計算の3つの柱で研究を進めている。これまでに下記のような成果を挙げ、最終目標に向かって着実に進行中である。

マイクロマシン班：ツインナノプローブの製作

真空トンネル電流を制御する、マイクロマシンデバイスを製作する一方、ナノ構造を自由に測定するため、太さわずか100nmで長さ5mmのツインナノプローブをマイクロマシニング技術で製作した。各々のプローブは、下の写真(図1)に示すマイクロアクチュエータで独立に動かすことができる。超高分解の電子顕微鏡中で、ナノプローブを動かした。プローブ先端のギャップは、最初400nmであったが、アクチュエータで完全に閉じることができた。ナノ領域の量子構造や表面物性の測定に活用したい。

マイクロアクチュエータ



観察用貫通孔

ナノプローブ

可視化班：高精度位相シフト干渉計測法

可視化グループでは、微小領域の物理量を電子干渉およびレーザー干渉を用い

て可視化する研究に取り組んできたが、今回、光学分野でほとんど例のなかった透過顕微鏡型の位相シフト干渉計測法と、それに基づくハードウェア、ソフトウェア両面の技術を確立した。

図 2 はこの透過型位相シフトレーザ干渉顕微鏡の概略を示したもので、複プリズムを計算機制御により微量ずつ矢印の方向にずらしながら、試料の像と参照光との干渉画像をM (M:3 以上の正数) 枚計算機に取り込み、計算によって試料各点を透過したレーザ光の位相を求めるという特徴を有している。このなかで、計測の障害となる特定の部分のレーザ光を排除する遮光板を設置し、また干渉計自身に起因するひずみの補正法を確立することによって、誤差を数分の1に低減することが可能となり、 $1/60 \sim 1/100$ 波長の計測精度を達成することができた。

この方法を光導波路内部の屈折率分布の計測に応用した例が図 3 である。光導波路に垂直にスライスした厚さ約 0.12mm の試料を用いて、光導波路断面の屈折率分布を見たもので、中央の等高線の密な部分が光導波路、右辺側が石英基板、光導波路の上下および左側がクラッド層である。等高線の白-黒は $1/10$ 波長の位相変化、屈折率分布に換算して 4×10^{-4} の屈折率差に対応している。この図から、光導波路の断面形状はほぼ矩形であるが屈折率分布は同心円状になっていること、石英基板とクラッド層とはほぼ均一な屈折率になっていることなどが明瞭に読みとれる。これは、サブ μm 領域における屈折率分布を観察した世界で初めての例である。

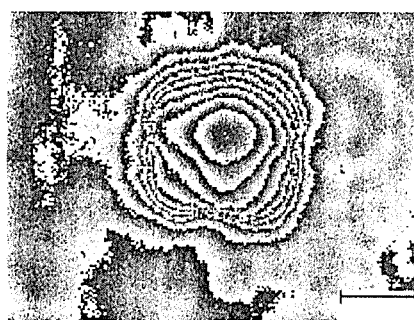
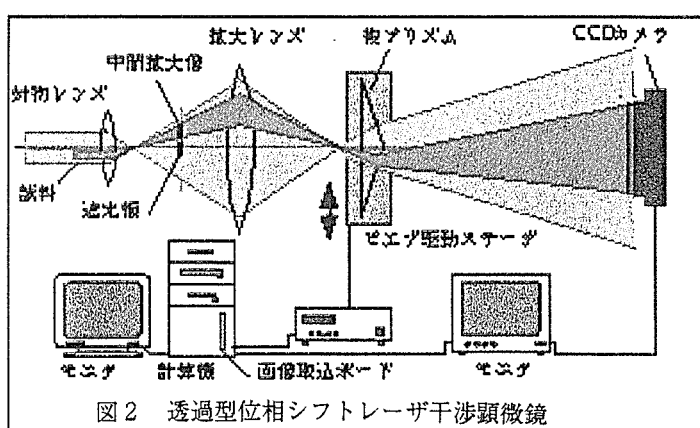


図 3 光導波路断面の屈折率分布

理論班：高電界下の電子状態計算

局所高電界場中の物理現象を原子・電子レベルから理論解析する上での大き

な障害は、高電界場という条件のもとで適用できる方法論がない点である。そこで我々は、2つの新しい方法論を開発した。1つは、電極内部と表面との間の電子の移動も考慮しながら、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である。既に同様の方法の提案はあるが、本手法は信頼性を損なわずにより簡明なアルゴリズムを実現した。この新手法を金属表面からの電界電子放出現象に適用した結果、単純なモデルに基づく従来の解析では定量的な電流値の評価に問題があり、また電界が強い場合には定性的にも破綻してくることを見出した(図4)。開発したもう1つの手法は、複数個の物体からなる系について、物体間に電流が流れない場合の電子状態を密度汎関数法に基づいて計算する方法である。密度汎関数法は広く用いられている有力な計算手法であるが、このような場合には非現実的な電荷移動が起きて誤った答を出すことが知られている。これに対し本手法では、各物体の電荷量を一定に保ちつつ電界分布や電子状態を自己無撞着に計算することによって問題を解決した(図5)。上に述べた新しい方法論は、相補的な有効範囲を持つため、真空マイクロデバイスの解析等に有用である。

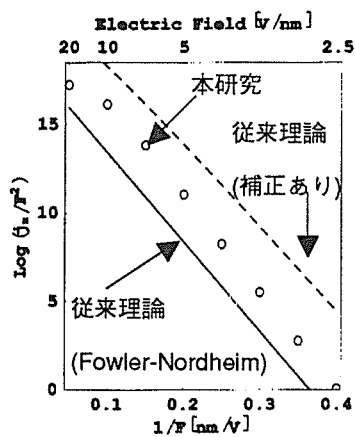


図4：電界放出電流(j_e)と電界(F)の関係(計算結果)

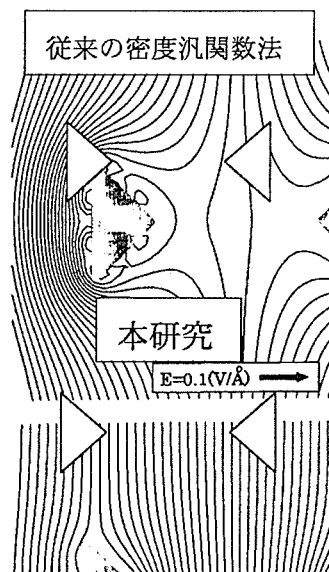


図5：一様電界中の2物体周囲の電界分布(計算結果)