^{み析の原理 41} 電子顕微鏡④ 集束イオンビーム (FIB) 装置の原理と応用

大西 毅 (株式会社日立ハイテクノロジーズ)

1. はじめに

集束イオンビーム(Focused Ion Beam :FIB) 装置は、集束したイオンビームを試料に照射し、 加工や観察を行う装置である。

FIB で試料内部の所望位置の構造を切り出すこ とができるため、特に近年活発に開発が行われて いる3D デバイスや高機能材料の解析や品質管理 に欠かせない装置となっている。

2. FIB の原理

図1は、典型的な FIB 装置の構成図である。 イオン源から放出されたイオンを静電レンズで試 料上に集束させ、静電偏向器で走査する。試料か ら放出される二次電子を走査と同期して検出し、 走査顕微鏡像を得る。得られた画像を基に加工領 域を設定し、イオンビームを設定領域のみに照射 し加工を行う。



図2は、FIB 装置で一般的に使われている液体 金属イオン源(Liquid Metal Ion Source: LMIS) の構成図である。イオン材料としては下記の理由 で通常ガリウム(Ga)が使われる。

・原子量が69.723と比較的重く、加工に十分なス

パッタリング速度が得られる。

- ・融点が29.8℃と低く、一度加熱すると過冷却現 象で室温でも液体の状態で動作する。
- ・針材料のタングステン(w)と反応せず、なお かつ一定の濡れ性も保つため、針先端部への流 れが安定する。





W 針先端のガリウムには、表面張力と引き出 し電極に印加した高電圧よる静電引力が作用し、 コーン状の液体が形成され、その先端部からイオ ンが放出する。イオンのエネルギー広がりが 5eV 程度と大きいため、シャープな加工形状を得るに は加速電圧を高くして、色収差の影響を小さくする。 現在市販されている FIB 汎用機のビーム仕様は、 電流 1 pA ~ 100 nA、電圧~ 30 kV 程度のもの がほとんどである。

FIB は加工面にダメージ層を形成する。シリコ ンへの断面加工の場合、加速電圧を 10kV に落と しても、9nm 程度のアモルファス層が形成され る。従って、実際の加工においては、このダメー ジ層を考慮したビーム条件の選定が必要になる。

3. FIB の3機能

イオンは電子と比較して質量が大幅に大きく、 試料原子と強い相互作用を起こす。このため、以 下の3つの機能を使い分けることができ、これら を組み合わせてさまざまなアプリケーションが創 生できる。

(1) 見る (Scanning Ion Microscope: SIM)

イオンは試料との最初の衝突でほとんどの運動 エネルギーを消費するため、試料最表面の情報が 画像化できる。また、結晶性の試料では強いチャ ネリングコントラストが得られる。

(2) 削る (Sputtering)

イオンビームの軌道に沿った方向性のある加工 ができる。また、ビーム走査の位置と時間を制御 することで、3次元的な加工も可能である。

(3) 付ける (FIB Assisted Deposition: FIB-AD)

ガスを併用することで、局所的にデポジション 膜を形成することができる。ガス種を選ぶことで、 導電膜や絶縁膜が形成できる。



図3 FIB の3機能

4. SEM との複合化

FIBと SEM(Scanning Electron Microscope) を複合化することで、アプリケーションの幅が更 に広がる。FIB で加工した断面を SEM 観察する ことにより、試料の内部構造が把握できる。また、 FIB 加工と SEM 観察を繰り返し行い、得られた 連続 SEM 画像をコンピューター上で再構成する ことにより、試料の三次元解析が可能となる。



図4 FIB-SEM

5. FIB の応用

以下、応用事例について紹介する。 (1)断面加工と断面観察



図5 半田ボールの断面 SIM 写真

半田ボールの断面加工を行った事例を図5に示 す。SIM 像で金属層のグレインが明瞭に観察で きている。観察を SEM で行う場合は、EDX の 併用で異物等の元素分析が可能である。FIB は原 子レベルのスパッタリング現象を利用した加工で あるため、試料に機械的なストレスを与えず断面 加工が行える。

(2) TEM 試料加工

試料内の注目部位(不良や欠陥の場所)をピン

ポイントで TEM (Transmission Electron Micro -scope) 解析する場合、マイクロサンプリング法 が利用できる。前記 FIB の3機能とマニピュレー タを組み合わせて目的部位を含む微小ブロックを 摘出し、TEM 試料台に搭載後薄膜化加工を行う。



図6 マイクロサンプリングの手順

試料を100 nm 以下まで薄膜化すると高エネル ギーの電子線が透過するようになり、TEM 観察 が可能となる。最先端デバイスでは構造を分離す る目的で10 nm 程度まで膜厚を薄くする必要性 が出てきており、SEM による加工終点検知、裏 面からの FIB 加工、低加速 FIB やアルゴンビー ムによる仕上げ加工等の技術を駆使して TEM 試 料を作製する。



図7 TEM 試料(上部が Si 基板)

(3) 3次元再構成

図8は5nmピッチで3D-NANDメモリーの 連続断面SEM像を取得し、それを再構成して3 D表示させたものである。再構成後は、任意位置 の断面をコンピューター画面上に表示でき、構造 の確認や寸法の計測が可能となる。



図8 3Dメモリーの3D再構成画像

6. おわりに

FIB の原理と応用について、最も多く用いられ ている Ga-LMIS を搭載した FIB をベースに解説 した。

LMIS は 1975年 、R.Clampitt が発明したもの で、以来 FIB 技術は急速に発展した。近年、原 理の異なるイオン源を搭載して、低電流側と高 電流側で Ga-FIB にビーム性能で勝る装置が開 発されている。低電流側は GFIS (Gas Field Ion Source)を用いた FIB で、1 nm 以下の像分解 能が報告されている。高電流側は、ICP-Plasma イオン源を用いた FIB で、 μ A オーダーのビーム 形成も可能であり、TSV (Through-Silicon Via) 等の大面積加工に使われはじめている。

FIB 技術はまだまだ発展途上であり、今後も革 新的な装置や新しいアプリケーションが生まれる 可能性を秘めている。