

FIB-SEMによる3次元形態・構造解析

FIB-SEMによる形態観察・構造解析技術は金属分野、エレクトロニクス分野で広く用いられているが、その技術を応用した3次元構造解析については、まだそれほど認知されていない。集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) 加工装置、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscopy) それぞれが単体装置の場合、加工・観察を繰り返してえられる画像を3次元構築することは困難であるが、同一装置内にFIB、SEMを内蔵したデュアルビーム装置を用いると、自動で加工・観察を繰り返すことができ、精度・効率よく観察像の3次元化が行える。とくに半導体デバイスにおいては、3次元化することで内部構造が視覚的にわかるため、欠陥解析・形状確認に対し有効な手法といえる。

本稿ではデュアルビーム装置を利用したFIB-SEM 3次元構造解析の代表的な事例を紹介する。



技術本部
エレクトロニクス事業部
物理解析部
ナノ組織解析室
飯田 則之

D-1 デュアルビーム装置の特徴 (構造と仕様)

第1図に装置の外観、第2図に装置構成の模式図を示す。その名が示すとおり、2本の鏡筒 (FIBとSEM) が一つの装置に組込まれている。第2図で示すように、鏡筒の配置はSEM (電子線ビーム) の入射方向が垂直であるのに対し、FIB (Gaイオンビーム) はSEMに対して52° 傾斜の入射方向である。両ビームの交点に試料を置くことで、目的個所の加工・観察が同時に行える。微小領域を断面観察しながらFIB加工できるため、透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscopy) 用の試料作製においても効果を発揮する。

デュアルビーム装置を用いてFIB加工 (断面出し) を行う利点を以下にあげる。

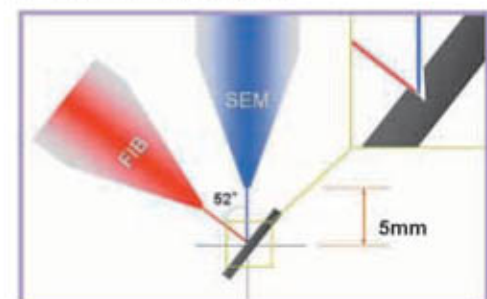
- ・ SEM像を確認することで、目的個所を消失することなく50nm程度の位置精度で加工を行える。
- ・ 加工・観察を同一装置内で行えるので、大気に触れずに真空保持されたまま断面SEM観察ができる。
- ・ 目的個所を断面SEM観察したあとに、その個所のTEM用試料作製ができる。
- ・ 電子ビームを用いた保護膜堆積が可能である (Gaイオンビームを用いた保護膜堆積においては試料に与えるダメージが問題となることがある)。

第1表にデュアルビーム装置の仕様を示す。

第1図 デュアルビーム装置外観



第2図 デュアルビーム装置構成



第1表 デュアルビーム装置仕様

項目	内容	
機種 (装置名)	FEI社製 Nova200 Nano-lab	
概要	高分解能DualBeam (FESEM+FIB)	
SEM	電子銃	ショットキー方式電界放射型
	分解能	15kV 1.1nm
	加速電圧	500V~30kV
	WD	5mm
FIB	Ion銃	液体金属ガリウム (寿命1000時間)
	SIM分解能	30kV 7nm
	加速電圧	5kV~30kV
	電流値	1.0pA~20nA (15段階)
デポジション機能	Pt, C	
自動加工ソフトウェア	AutoSlice&View	
検出器	SPI SEM/FIB像 同時観察	可能
	観察用検出器	ETD検出器 In Lens検出器
	反射電子検出器	In-Lens検出器 (BSE)
	STEM検出器	(明視野・暗視野)
	試料室内部観察	IR-CCDカメラ標準
試料室及び試料微動	試料交換方式	ロードロック
	最大試料サイズ (X-Y)	最大200mmφ
	最大試料サイズ (厚み)	最大20mm
	ステージ可動範囲 (回転)	360度連続
	ステージ可動範囲 (傾斜)	-10~60度
真空系	試料室メイン	ターボ分子ポンプ×1
	試料室ろびき	スクロールポンプ×1
	電子銃室	イオンゲッターポンプ×3

D-2 画像の3次元構築

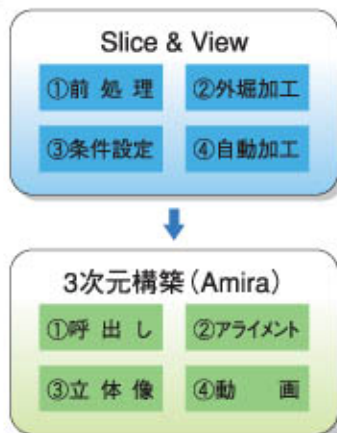
デュアルビーム装置を用いた3次元構築の流れを第3図に示す。1段階目として、装置に備え付けられているSlice & View機能を用いてデータ取得する。これは、任意の加工ピッチでFIB加工と断面SEM像の取得を自動で繰り返すことで、データを蓄積させていく機能である。断面観察時に問題となるFIB加工による再付着物や加工痕などは、できるだけ視野に入らないように注意する。具体的な対策としては、①ビーム電流量を増やす、②コの字型に外堀加工をする、③ピッチ幅を小さくする、などがあげられる。観察対象となるものが、異物やプラグのように加工範囲内に数 μm 程度と小さい場合は、加工ピッチを対象物の大きさの1/10以下にして、対象物を10回以上刻むように設定する。最小の加工ピッチは50nmであるため、目的物の大きさは500nm以上が望ましい。また、現実的な最大加工サイズとしては、加工幅/50~100 μm 、深さ/40~50 μm 、奥行き/50~100 μm 程度である。

SEM観察（断面像取得）の条件としては、試料の材質にもよるが、加速電圧を極力抑えた設定（2kV以下）で、奥行き情報の検出を少なくすることが重要である。

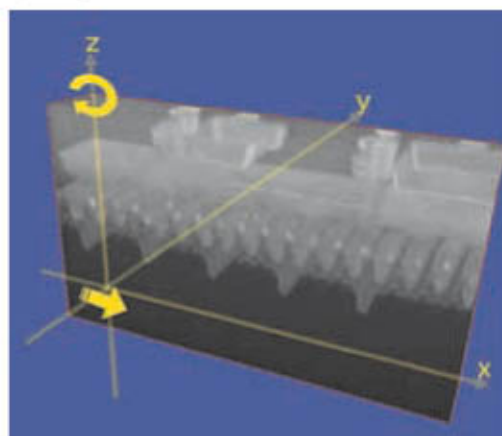
次に2段階目として、SEM連続画像を汎用の画像処理ソフトAmiraを用いて3次元構築する。最初に3次元化したときに不自然な形にならないように、アライメントを合わせる。ここでは、2枚のSEM像を重ね合わせた状態にして位置ずれを補正する。1枚目と2枚目、2枚目と3枚目、……というように位置合わせを繰り返す。

このようにしてえられた画像は立体像として任意の側面から眺めることが可能で、多角的に情報を入力することができる。また、任意の断面を抽出して評価することも可能である。汎用ソフトAmiraがあれば、どのPC端末からも自在に閲覧や操作ができ、x、y、zそれぞれの軸方向に断面を任意のスピードでスライドさせた映像をMPEG形式でムービー保存も可能である（第4図）。

第3図 3次元構築の流れ



第4図 立体像(半導体デバイス)



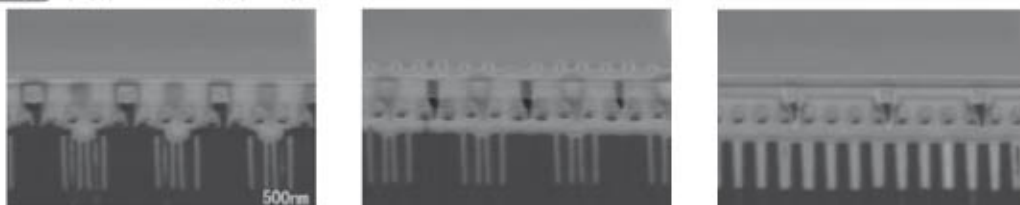
D-3 観察事例

(1) 評価事例*1) —— 半導体デバイスの3次元形状観察

事例として、半導体デバイスの形状を評価した例を紹介する。第5図にはデバイスの断面SEM像、

第6図には3次元観察結果を示す。トランジスタを形成する主要部位であるゲート、コンタクト、キャパシタの形状を観察し、欠陥がないかを確認することが目的である。これらの部位に欠陥が存在するとデバイスとしての機能を果たさない。

第5図 半導体デバイスの断面SEM像

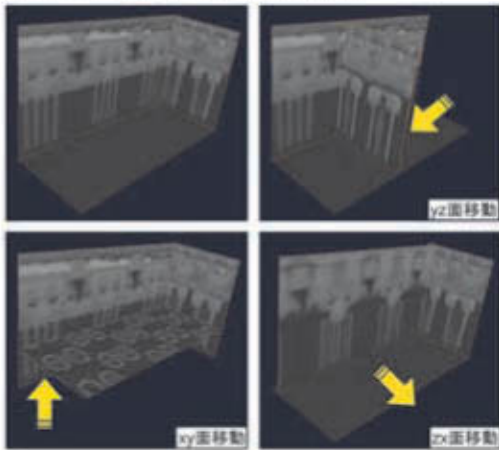


参考文献

*1) 日本表面科学学会編：表面技術選書 ナノテクノロジーのための走査電子顕微鏡、(2004)、丸善

第6図のxy断面を切出した像から、キャパシタ部分の形状がどのようになっているかが確認できる。また、yz断面像からは、PolySiゲートがy方向に山なりの形状であることがわかる。このように、観察中の断面からでは把握しきれない部分も、画像の3次元構築後、3方向から切り出した像で評価が可能である。ただし、ゲート酸化膜などnmオーダーで観察・分析が必要な場合はTEMを用いる必要がある。

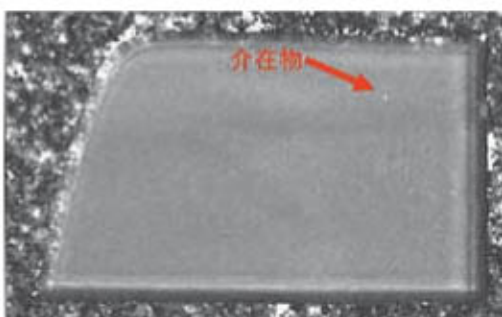
第6図 半導体デバイスの3次元観察結果



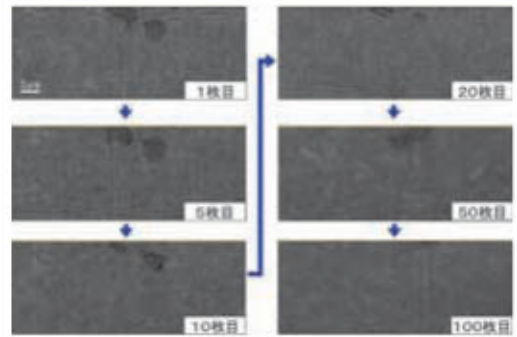
(2) 解析事例*2) — 鉄鋼材料中の介在物の3次元形状観察

鉄鋼材料中に Al_2O_3 をはじめとした介在物が、意図せずできてしまうことがある。亀裂発生の原因としても考えられる介在物を、3次的に形状と分布を調査することが目的となる。第7図に超音波顕微鏡による観察結果、第8図に断面SEM像の途中経過、第9図～第10図に介在物の立体像を示す。前処理として超音波顕微鏡によりその位置を割り出し、機械研磨・マイクロームにより介在物を表層に露出させる。目的の介在物の大きさが超音波顕微鏡のデータから把握できないため、加工範囲を広くとりSlice & Viewを行い、3次的に構築している。第10図に示すように介在物のみを抽出して立体像としたことで、その分布、形状が視覚的にわかる。この結果から、将来的には亀裂の発生メカニズムが解明されることと期待される。

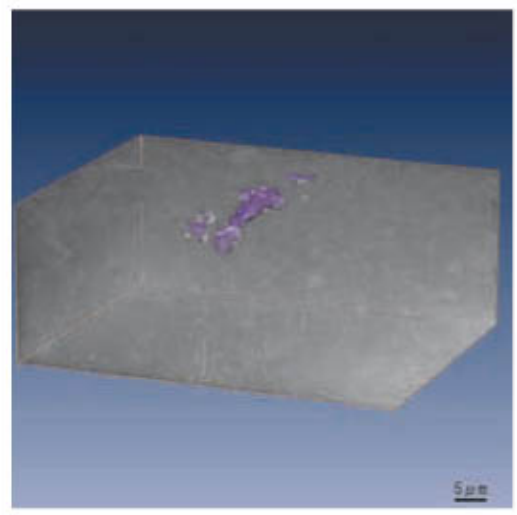
第7図 超音波顕微鏡による介在物観察結果



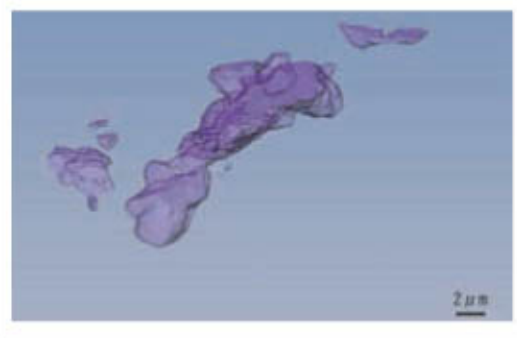
第8図 介在物Slice & View断面SEM像(途中経過)



第9図 介在物の立体像



第10図 介在物の立体像(抽出)



デュアルビーム装置によるSlice & View機能と画像の3次元構築用ソフトAmiraを用いて3次元形態・構造解析を行った例を紹介した。この手法を取入れることで、半導体デバイスや発光デバイス、液晶などの欠陥解析・構造解析に対して有益な情報がえられる。また、金属をはじめ各材料分野においても、サブミクロンオーダーでの3次元構造解析のニーズが高まっている。これらの要求に対応すべく、当社は、現行デュアルビーム装置の後継機の導入を検討している。多種多様な試料に対応する当社の技術力・ノウハウを多種材料評価に活用いただきたい。

参考文献

- *2)
- 日本金属学会編：
まてりあ、Vol.46, No.12
(b) FIB利用技術