測る――社会・産業分野に貢献する計測技術

原子レベル計測のための試料自動作製技術

ーFIBマイクロサンプリング「NB5000」ー

Auto Fabrication Technology of Electron Microscope Specimen for Atomic Order Measurement

富松 聡 関原 雄 會澤 恵

Tomimatsu Satoshi Sekihara Isamu Aizawa Megumi

南里 光栄 大西 毅

Nanri Terutaka Onishi Tsuyoshi

微細化が進む半導体デバイスの構造評価や故障解析には、原子レベルでの計測が不可欠となっている。原子レベル計測を実現する透過電子顕微鏡では計測所望領域を100 nm程度に薄膜化した試料が必要であり、試料作製の容易化が望まれている。

このため、日立グループは集束イオンビームマイクロサンプリング技術を用いた透過電子顕微鏡試料の自動作製技術を開発した。この加工技術を用いることにより、ユーザーの技術レベルを問わない試料作製を実現できるため、原子レベル計測を容易化することができる。

1. はじめに

半導体デバイスの微細化は年々進み、原子レベルでの構造制御が重要になってきている。これに伴い、従来は手軽に構造評価が可能であった SEM (Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡)による構造評価では分解能の観点で十分ではなくなりつつある。原子レベルでの構造評価や故障解析が可能な観察装置として、TEM (Transmission Electron Microscope: 透過電子顕微鏡)や STEM (Scanning Transmission Electron Microscope: 走査透過電子顕微鏡)がある。しかし、試料の表面を観察する SEMと異なり、TEM/STEM は電子線が試料を透過する必要があり、そのために試料の観察する領域は 100 nm程度、もしくはそれ以下に薄膜化しなければならない。半導体ウェーハやチップから観察すべき場所を狙って薄膜試料として加工するためには FIB (Focused Ion Beam: 集束イオンビーム)装置が有効である。

日立グループは、FIB加工とナノプロービング技術を組み合わせたマイクロサンプリング装置を1999年に世界で初めて発売し、これはTEM/STEM試料の作製法として広く普及した。今回、FIB加工やナノプロービングの操作でユーザーの技術レベルに依存しない、誰でも容易に試料作

製ができる自動作製技術を開発した。

ここでは、FIB装置による試料作製加工の自動化機能について述べる。

2. 試料加工装置の特徴

集束イオン/電子ビーム加工観察装置「NB5000」は自動試料作製機能を搭載するFIB装置である(図1参照)。 FIB加工機能とSEM観察機能を併せ持ち、高精度の位置指定を必要とする試料作製に適している。

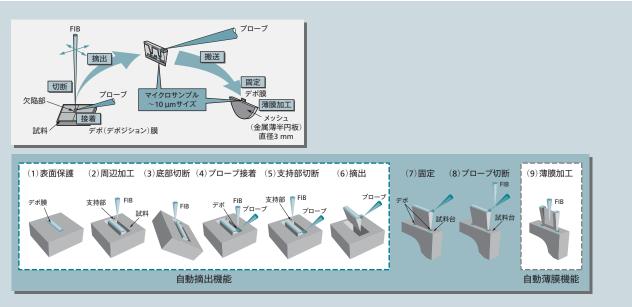
NB5000を用いたTEM/STEM試料作製のマイクロサンプリング加工フローについて以下に述べる(図2参照)。

2.1 FIBマイクロサンプリング

FIBマイクロサンプリング法 $^{1),2)}$ では $10~\mu m$ 程度のサイズの微小試料 (マイクロサンプル) のみを摘出し、TEM/



図1 | 集束イオン/電子ビーム加工観察装置「NB5000」の外観 集束イオンビーム光学系と電子ビーム光学系を有する (2007年発売)。



注:略語説明 FIB (Focused Ion Beam)

図2 マイクロサンプリングの概要と加工フロー

10 µm程度のサイズの微小試料だけを摘出し、専用試料台へ搬送し、薄膜化することによって透過電子顕微鏡試料を作製するフローである。青色点線枠内のフローの自動化を自動摘出機能、灰色点線枠内のフローの自動化を自動薄膜機能とする。

STEM試料とする。この加工には、二つの方向からのFIB 加工による摘出微小試料の切り離しや、摘出するための微細なプローブの操作といった複雑なフローが必要であるため、従来はユーザーによる確実なマニュアル操作が必要であった。特にプローブは、所望領域にかからないように摘出微小試料の端の1 µm程度の狭い領域に接触させる必要がある。さらに、プローブの操作はFIBによるSIM (Scanning Ion Microscope) 像や電子ビームによるSEM像といった二次元画像を見ながらのミクロンオーダーでの三次元操作であり、ユーザーの細心の注意が必要であった。幅広いユーザーが容易にマイクロサンプリングを使用するためには、このようなユーザーの注意を必要とせず、表面保護膜形成[図2(1)]から微小試料摘出[同図(6)]までの加工を自動で行い、微小試料を摘出可能な自動摘出機能が望まれている。

2.2 薄膜加工

ユーザーのTEM/STEM試料作製の負担は、摘出工程に加え、薄膜加工 [同図 (9)] が大きなウェイトを占める。これはTEM/STEMで観察したい位置を100 nm程度、もしくはそれ以下の膜厚の薄膜に正確に残す必要があるからである。さらに薄膜加工では、厚みが均一な薄膜を作製することが重要である。FIB加工では、試料表面に対して垂直にFIBを照射して加工した断面には、スパッタレート角度依存性から微小傾斜 (テーパ) ができることが知られている³)。このままでは、上側(試料表面側)が薄く、下側(深い領域)が厚い薄膜が形成されてしまい、深い領域が

TEM/STEMで観察しづらい試料となる問題が生じる。薄膜全面を原子レベルで計測するためには、このテーパをなくして上下方向に平行な薄膜を作製する必要がある。このように、薄膜加工も従来はユーザーの熟練操作が必要であり、自動化が望まれている。

3. 試料作製自動化技術

3.1 プローブ操作の自動化

自動摘出加工ではプローブ操作がキー技術であり,プ ローブ接触における最重要課題は、プローブの先端位置を 自動で認識することである。SIM像で観察される平面を XY平面とすると、プローブ先端のXY面内位置をSIM像 の画像認識で行う場合には、以下の問題がある。プローブ 先端を含む参照SIM画像を取得する場合、通常はプロー ブの下方に試料が存在し、試料には表面パターンなどが存 在する。試料表面にどのようなコントラストのパターンが 含まれるかは試料により異なるため、プローブコントラス トと試料表面コントラストが近い場合、プローブ形状を画 像照合で自動的に判別することは難しい(図3参照)。こ のため、プローブ先端形状のみを確実に抽出可能な方法が 必要となる。今回、このプローブ先端形状抽出にSIM像 の代わりにプローブ吸収電流像を用いる方法を検討した。 プローブ吸収電流は、EBAC (Electron Beam Absorbed Current) 解析などに用いられる機能である。通常のEBAC はプローブを解析するデバイスの配線などに接触させ、電 子ビームを走査しながらプローブに流れ込む吸収電流量を 画像化することにより、配線断線位置などを特定できる機

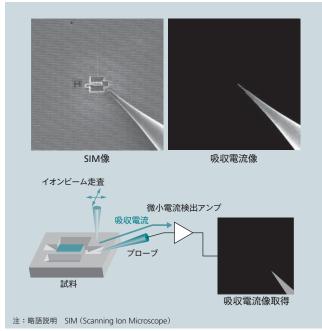


図3 プローブ先端自動検出

SIM像では試料表面構造とプローブ形状の自動識別は困難だが、吸収電流像ではプローブのみを画像化できるため、先端を正確に識別することが可能である。

能である。このプローブが試料に接触していない状態で FIB 走査時のイオンビーム吸収電流を取得することにより、プローブに FIB が照射された位置のみ吸収電流が検出される。プローブ位置以外では吸収電流が検出されないため、プローブ形状のみを抽出でき、現在のプローブ先端座 標を正確に取得することが可能になる。

プローブ接触は以下のフローで行う。初めにプローブを目標位置と異なる試料表面上の位置にいったん予備接触させる。接触検知はプローブと試料ステージの間の電気的導通検知によって行う。続いてプローブを微小量上昇させ、接触を解除して吸収電流による先端座標検出を行う。こうして取得されたプローブ先端座標を基に接触目標位置上空へ移動し、目標位置との誤差が±0.5 µm以下になるまでプローブ先端位置補正移動を繰り返す。目標位置上空にプローブ先端が位置決めされたら、再度プローブを降下し、電気的導通検知で目標位置への接触を完了させることで、プローブの目標位置への自動接触が実現できた。

3.2 薄膜加工の自動化

薄膜の深さ方向への厚み増加の問題を解決し、テーパのない平行な薄膜を作製するためには、形成されるテーパ角度を考慮した加工が必要である。すなわち、形成されるテーパ角分をステージの微傾斜によって姿勢設定を行い、片面ずつFIB加工することが有効である(図4参照)。ただし、ステージ微傾斜によって位置ずれが生じるため、この薄膜自動加工では、摘出微小試料上にマークを形成し、

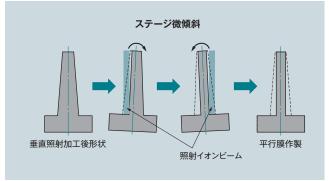


図4 自動薄膜加工フロー

微傾斜による片面ずつの加工を繰り返すことで平行膜を作製する。

マーク認識により、ずれ量を補正することで正確な薄膜加工を実現した。

4. 試料加工例

4.1 自動摘出加工例

保護膜デポ (デポジション) 加工から微小試料摘出完了までの工程を,人手を介すことなく自動で行った様子を,BSE (Backscattered Electron:反射電子) 像で記録した動画から抜粋したものを図5に示す。

BSE像を形成するSEM光学系は、FIB光学系と58°を成しており、ステージ傾斜0°時の試料表面を32°上方から俯瞰(ふかん)した像となっている。FIBによる保護膜作製、スパッタ加工などは、あらかじめ設定した摘出加工マクロパターンと加工位置近傍に作製したマークによるずれ認識によって実施している。特に、同図(c)の底部切断加工では試料ステージを45°傾斜させるため、目標加工位置が大幅にずれるが、マークサーチによって移動誤差量を求め、FIBの偏向を補正し加工位置がずれないようにして正しい位置の底切りを実現した。同図(e)ではBSE像の積算機能

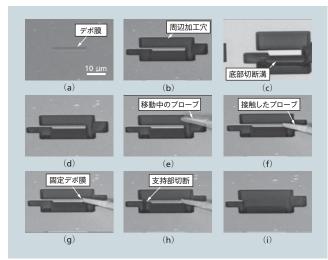


図5|微小試料自動摘出加工例

自動摘出加工マクロパターンを設定するだけで、表面保護から摘出までの工程を無人で行うことができる。

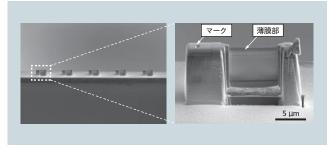


図6 自動薄膜加工の連続加工例

あらかじめ自動薄膜加工マクロパターンで加工位置を設定することにより、 複数試料を連続して薄膜加工仕上げをすることができる。

のため、移動中のプローブの残像が捉えられている。このプローブ移動は前述した正確な自動プローブ位置決めによるものであり、同図 (f) ではプローブが微小試料の端に正しく自動接触していることがわかる。さらに接触時は、プローブの試料への接触速度を5 μm/s と低速に抑えることで、微小試料やプローブ先端の破損を抑制している。これは、同図 (h) 支持部切断時の微小試料の移動がほとんどないことからも、応力がほぼかからない接触が実現できていることがわかる。同図 (i) ではプローブ退避により、微小試料が摘出され、加工穴のみが残る様子が確認された。

この自動摘出加工に要した時間はおよそ11分であり、 あらかじめマクロパターンを設定するだけで摘出加工を無 人で行うことができる。

4.2 自動薄膜加工例

微小摘出試料に位置補正用マークを形成し、ステージ微傾斜機能を組み込んだ薄膜加工マクロパターンによる薄膜自動加工を5個の微小試料に対し連続で行った例を図6に示す。薄膜部は、薄膜両面の0.8°微傾斜加工によって深さ5μm以上まで十分に薄い薄膜を形成できた。

この自動薄膜加工に要した時間は1サンプル当たり、およそ20分であり、あらかじめマクロパターンを設定するだけで複数微小試料の薄膜加工を無人で行うことができる。

5. おわりに

ここでは、FIB装置による試料作製加工の自動化機能について述べた。

FIB加工と吸収電流を用いたプローブ先端座標自動検出を組み合わせて実現した保護膜作製から微小試料摘出までの自動摘出機能や,ステージ微傾斜加工を組み込んだ自動薄膜加工機能などの自動化機能により,TEM/STEM 試料作製を容易化できるため,原子レベル計測を身近なものとすることができる。

日立グループは、試料作製装置操作性のいっそうの向上 をめざし、自動化技術の開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 富松,外:FIB加工とマイクロマニピュレーション技術を用いたTEM試料作製法, 第58回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1997.10,秋田大学) 3pZL,p. 666 (1997.10)
- T. Ohnishi, et al.: A New Focused-Ion-Beam Microsampling Technique for TEM Observation of Site-specific Areas, Proceeding from the 25th International Symposium for Testing and Failure Analysis (14-18 Nov., 1999, Santa Clara, California) pp.449-453 (1999)
- 3) T. Ishitani, et al.: Transmission Electron Microscope Sample Preparation Using a Focused Ion Beam, Journal of Electron Microscopy, 43, 322-326 (1994)

執筆者紹介



富松 聡

1993年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 科学・ 医用システム事業統括本部 科学・医用システム設計開発本部 先端解 析システム第二設計部 所属

現在,集束イオン/電子ビーム加工観察装置の開発に従事 日本顕微鏡学会会員,応用物理学会会員



関原 雄

1988年株式会社日立超LSIシステムズ入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ 科学・医用システム事業統括本部 科学・医用システム設計開発本部 先端解析システム第二設計部 所属

現在、集束イオン/電子ビーム加工観察装置の開発に従事



會澤 恵

1989年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ 科学・ 医用システム事業統括本部 科学・医用システム設計開発本部 先端解 析システム第二設計部 所属

現在,集束イオン/電子ビーム加工観察装置の開発に従事



南里 光栄

2005年株式会社日立ハイテクノロジーズ入社, 科学・医用システム 事業統括本部 科学・医用システム設計開発本部 先端解析システム第 二設計部 所属

現在,集束イオン/電子ビーム加工観察装置の開発に従事



大西 毅

1985年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 科学・ 医用システム事業統括本部 科学・医用システム設計開発本部 先端解 析システム第二設計部 所属

現在, TEM, STEM, FIB装置の開発を統括 日本顕微鏡学会会員