

微細化・高集積化デバイス対応 QTAT三次元ナノアナリシス技術

Three-Dimensional Device Evaluation System for Advanced Semiconductor Processes

矢口 紀恵 Toshie Yaguchi

大西 毅 Tsuyoshi Ōnishi

朝山 匡一郎 Kyōichirō Asayama

上野 武夫 Takeo Kamino

橋本 隆仁 Takahito Hashimoto



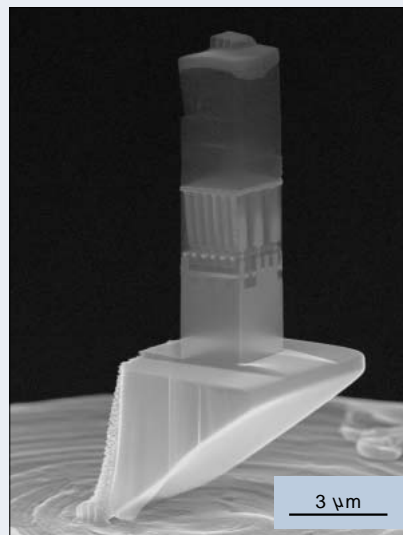
(a) 集束イオンビーム加工装置「FB-2100」



(b) STEM方式の超薄膜評価装置「HD-2300」



(c) 三次元解析ホルダ



(d) マイクロピラーサンプルの二次電子像

注：略語説明 STEM(Scanning Transmission Electron Microscope ; 走査透過電子顕微鏡)

三次元ナノアナリシスを提供する半導体デバイス評価システムとマイクロピラーサンプルの二次電子像

集束イオンビーム加工装置FB-2100(a)と、走査透過電子顕微鏡方式の超薄膜評価装置HD-2300(b)に、三次元解析ホルダ(c)を組み合わせることで半導体デバイス評価システムを構成する。マイクロピラーサンプルは、集束イオンビーム マイクロ サンプリングを用いて作製する。二次電子像(d)のマイクロピラーサンプル作製に要する時間は約30分である。試料は、360度回転が可能のため、さまざまな方向からの観察ができる。

微細化・高集積化された半導体デバイスの構造評価と故障解析には、サブミクロン領域の三次元微細構造解析が不可欠となっている。日立グループは、集束イオンビーム加工と走査透過電子顕微鏡での走査透過電子顕微鏡像および二次電子像観察の両方が可能で、装てんした試料が回転できる機構を備えた、集束イオンビーム加工装置・走査透過電子顕微鏡共用三次元解析ホルダを開発した。試料は、集束イオンビーム マイクロ サンプリング法によって抽出し、目的の構造物を含む柱状試料(通常0.1~5μm角)に加工する。試料作製に要する時間は20~30分である。走

査透過電子顕微鏡観察は、透過電子顕微鏡像観察に比べて色収差の影響が少ないため、厚い試料でも観察できるという特徴がある。また、200~300kVの高電圧で加速された電子を用いた二次電子像観察では、試料表面情報と同時に表面近傍の内部構造の情報も得ることができる。ホルダは集束イオンビーム加工装置・走査透過電子顕微鏡共用であるため、厚さ0.1μmに薄膜化して原子レベルでの構造解析も可能である。この解析技術を用いることにより、QTAT(Quick Turnaround Time)での半導体デバイスの三次元ナノアナリシスが可能である。

1 はじめに

微細化・高集積化が進む半導体デバイスの構造評価や故障解析には、サブナノメートルオーダーの解析技術が必須で

ある。最近、その手段として、透過電子顕微鏡を用いた原子レベルの高分解能観察・分析技術が重要視されている。しかし、従来の透過電子顕微鏡解析には、試料の前処理や観察に熟練した技術が必要なため、普及が進んでいないのが実情である。

一般に、電子顕微鏡で材料内部微細構造を観察する場合、試料を、厚さ約100 nmの薄膜に加工する。しかし、ナノメートルからサブナノメートルオーダーの微細構造が立体的に広がっている半導体デバイスでは、その厚さでも透過電子像に異種材料の重なりがみられ、真の構造をとらえることが困難になってきている。特に90 nmノード以降では構造がますます微細化されるため、この課題は無視できなくなる。

このような課題を解決する手段として、試料をサブミクロン角以下の柱状に加工し、それを傾斜、回転しながら観察する方法が開発され、電子デバイスの故障解析に応用されている¹⁾。この方法は、試料をさまざまな方向から観察できるため、解析個所の三次元構造を把握しやすいという特徴を持っている。

ここでは、約20～30分の所要時間でデバイスの特定個所から微小試料を取り出して柱状に加工する日立グループの試料前処理法と、その試料内部構造の原子レベルでの高分解能観察、および組成分布像観察を可能とする三次元ナノアナリシス技術について述べる。

2 半導体デバイス評価システムの特徴

今後の微細化デバイス解析のニーズとして、以下の3点が考えられる。

- (1) サブナノメートルオーダーの微小欠陥の高分解能観察・高感度分析技術
- (2) 特定局所領域から試料を取り出せる高精度加工技術
- (3) 前処理から解析までの高スループット解析技術

日立グループは、これらのニーズに対応するため、集束イオンビーム加工装置“FB-2100”と走査透過電子顕微鏡方式の超薄膜評価装置“HD-2000”を組み合わせた半導体デバイス評価システムを提供してきた。このシステムでは、特定局所領域から薄膜試料を取り出し、サブナノメートルの分解能で観察・分析を行うことが可能である。薄膜試料作製には、集束イオンビーム装置内でバレル試料から特定局所領域を取

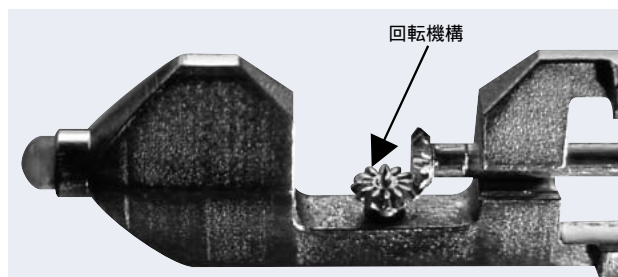


図1 集束イオンビームと走査透過電子顕微鏡共用三次元解析ホルダの先端部

回転機構の中心部にニードル形試料台を挿入する。試料は、ニードル形試料台の先端部に集束イオンビームマイクロサンプリング法によって固定する。

り出し薄膜化する集束イオンビームマイクロサンプリング法²⁾が広く用いられており、現在、その所要時間は約30分である。上記装置間の試料の移動には、集束イオンビーム加工装置と走査透過電子顕微鏡共用ホルダを用い、スループットの向上を図っている。また、HD-2000の後継機である“HD-2300”超薄膜評価装置では、オートフォーカス、オートスティグマなどの自動調整機能を搭載し、操作を迅速かつ容易に行えるようにした³⁾。

今回、上記(1)から(3)のニーズにこたえ、かつ今後のデバイス構造の微細化・複雑化に対応するために、試料を360度回転できる機構を備えた集束イオンビーム加工装置・走査透過電子顕微鏡共用三次元解析ホルダを開発した。

3 三次元ナノアナリシス技術

3.1 三次元解析ホルダによるマイクロピラー試料作製

集束イオンビーム加工装置・走査透過電子顕微鏡共用三次元解析ホルダの先端部の外観を図1に示す。試料は、回転機構中心に挿入されたニードル(針)形試料台先端部に固定する。ニードル形試料台は、集束イオンビームおよび走査透過電子顕微鏡試料室内で360度回転できる。試料加工の手順を図2に示す。まず、集束イオンビームマイクロサンプリング法によって試料の抽出を行い(同図(a))、次に、ニードル形試料台上にタングステンデポジションで固定する(同図(b))。最後に、解析個所を含む領域を、集束イオンビームを用いて必要な大きさ(通常0.1～5 μm角)に加工し、柱状試料(マイクロピラーサンプル)(同図(c))とする。微小試料の取り出しから柱状試料加工までの所要時間は約20～30分である。

3.2 走査透過電子顕微鏡を用いた厚い試料の観察の利点

走査透過電子顕微鏡では透過電子顕微鏡と比べて色収差の影響が少ないため、100 nm前後まで薄膜化しなくても、試料内部の構造を鮮明に観察することができる。さらに、試

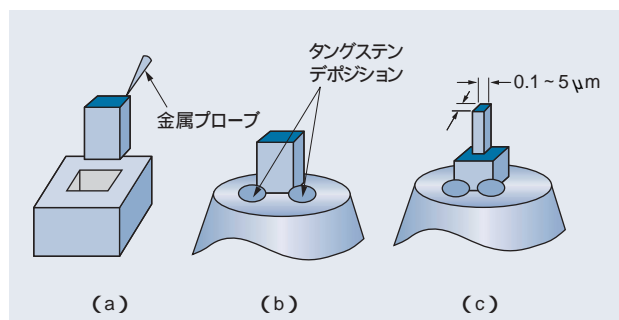


図2 マイクロピラー作製手順

最初に試料を抽出し(a)、次に抽出した試料をタングステンデポジションによってニードル形試料台に固定する(b)、最後に、集束イオンビーム加工で試料を観察したい大きさにトリミングする(c)。

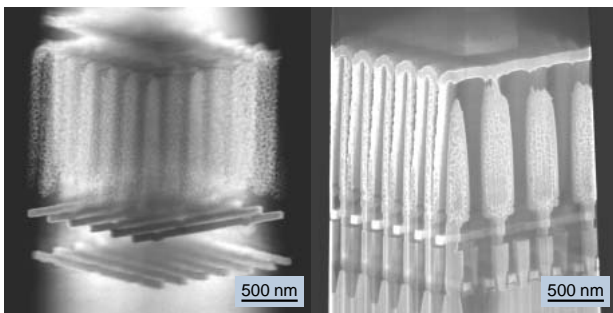
料によって散乱を受けた電子だけを用いて結像させた暗視野走査透過電子顕微鏡像では、散乱電子を信号として検出するため、さらに厚い試料の観察が可能となる。また、200 kVで観察する二次電子像は、試料表面と表面近傍内部構造を三次元的に再現する。

厚い試料の観察が可能であれば、試料の前処理時間も短縮することができる。また、特定領域の三次元構造を保ったままで、構造解析と組成分析を行うことができる。従来、電子顕微鏡を用いた材料解析には薄膜試料が用いられているので、得られる情報は二次元的なものに限定されていた。そのため、電子顕微鏡像を基にしたデバイス三次元構造評価には、憶測が伴うことが避けられなかった。柱状に加工した試料を走査透過電子顕微鏡で観察する今回の方法では、三次元構造をそのまま観察できるので、憶測を必要としない。したがって、構造解析精度は向上する。

4 観察例

4.1 DRAMキャパシタプラグの三次元立体観察

DRAM(Dynamic Random Access Memory)を2 μm角の柱状に加工したキャパシタプラグ部の暗視野走査透過電子顕微鏡像を図3(a)に、二次電子像を同図(b)にそれぞれ示す。Si基板に対して10度傾斜、45度回転して観察している。暗視野走査透過電子顕微鏡像では、試料内部のキャパシタの構造や、ビットラインとワードラインが直行する様子な



(a) 暗視野走査透過電子顕微鏡像 (b) 二次電子像
図3 DRAMキャパシタプラグ部(2 μm角)の暗視野走査透過電子顕微鏡像(a)と、二次電子像(b)の観察例

暗視野走査透過電子顕微鏡像(a)では、試料内部のキャパシタの構造や、ビットラインとワードラインが直行する様子などが立体的に観察できる。二次電子像(b)では、試料の断面近傍の構造を詳細に観察することができる。

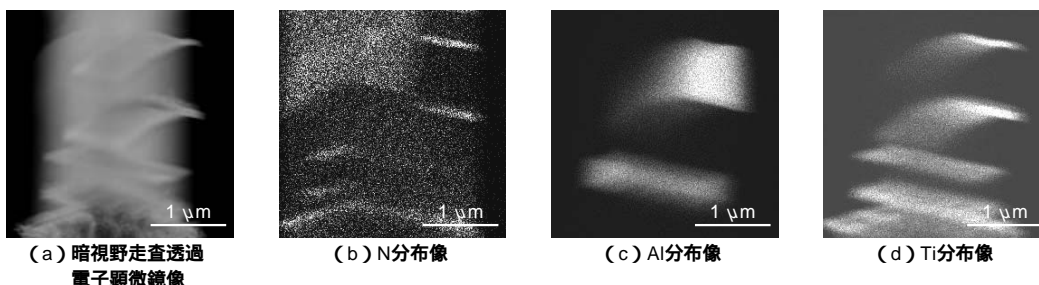


図4 DRAMのAl配線部(2 μm角)の組成分布像

暗視野走査透過電子顕微鏡像(a)とN(b)、Al(c)、およびTi(d)の組成分布像を示す。N、Al、Tiの分布が立体的に観察できる。

どが立体的に観察できる。二次電子像では、試料の断面近傍の構造を詳細に観察することができる。また、この方法では、柱状に加工した試料をニードル形試料台の先端に取り付けているため、EDX(Energy Dispersive X-Ray: エネルギー分散型X線)分析装置の検出器と試料の間に障害物がないことから、ノイズが少ない元素分析が可能である。2 μm角の柱状に加工したDRAMのAl(アルミニウム)配線部のEDXを用いた組成分布像を図4に示す。N、Al、Tiの分布が立体的に観察されている。

さらに、キャパシタプラグ1本だけを残し、0.5 μm×1 μmの柱状に加工した試料の明視野走査透過電子顕微鏡像を図5(a)に、暗視野走査透過電子顕微鏡像を同図(b)に、二次電子像を同図(c)にそれぞれ示す。キャパシタ、配線、およびプラグなどの微細構造が立体的に観察されている。HD-2300では、明視野走査透過電子顕微鏡像、暗視野走査透過電子顕微鏡像、および二次電子像の切り換えがワンクリックで行えるため、短時間にさまざまな情報を得ることができる。

4.2 配線破壊部の三次元立体観察

上述の方法を用い、金属配線を構成する金属原子が配線中に流れる電子との衝突により移動する現象である「エレクトロマイグレーション」に起因する配線破壊部を持つ配線の信頼性評価用TEG(Test Elements Group)パターンを観察した。電圧5 V、電流密度2.5 MA/cm²の電流を流し、Cu

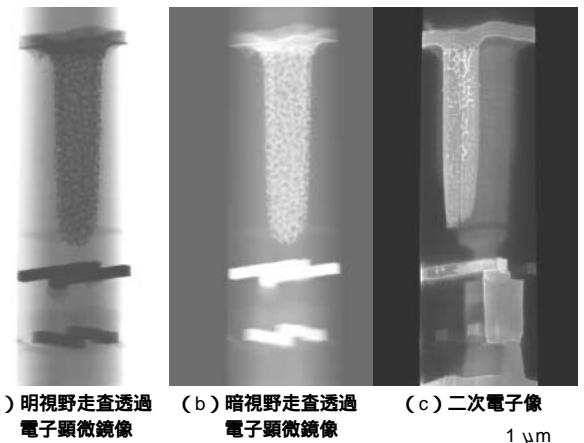


図5 DRAMキャパシタプラグ部(サイズ:0.5 μm×1 μm)の明視野走査透過電子顕微鏡像(a)、暗視野走査透過電子顕微鏡像(b)、二次電子像(c)

キャパシタ、配線、プラグなどの表面や内部微細構造が立体的に観察できる。

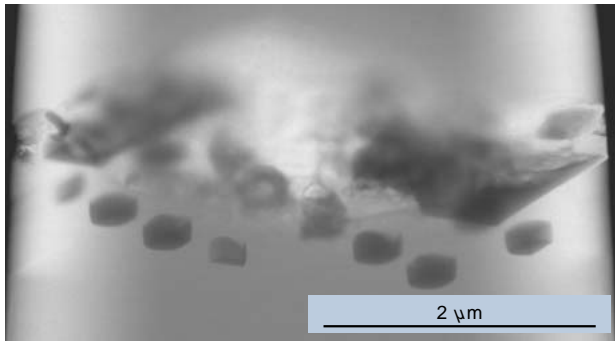


図6 エレクトロマイグレーション起因の配線破壊部の暗視野走査透過電子顕微鏡像の観察例

試料サイズは4 μm×2 μm, 中央の白いコントラスト部分がエレクトロマイグレーションによって生じたポイド部分である。暗視野走査透過電子顕微鏡像では, コントラストは原子番号と密度の積に比例する。

配線の一部を破壊したものである。破壊領域を光学顕微鏡によって確認し, その領域を包含する幅4 μm×奥行2 μm×高さ20 μmの柱状試料を作製し, その暗視野走査透過電子顕微鏡像観察を行った(図6参照)。破壊は約2 μmの領域にわたっており, 配線とともにマイグレーションを起こした部分が大きな損傷を受けていることや, 両配線間にポイドが発生していることなどを鮮明にとらえている。

4.3 Si単結晶基板の高分解能三次元観察

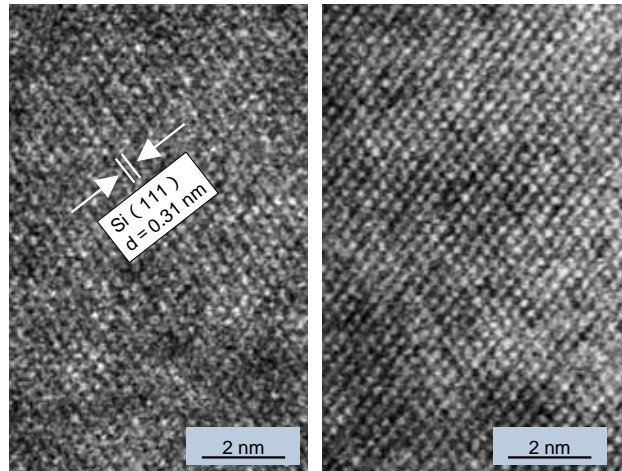
今後, 半導体デバイスの微細化に伴い, 多層薄膜界面の原子レベルでの観察や, 界面やバルク結晶中の欠陥の観察が必要とされる。そのため, 0.1 μm角のSi単結晶基板の柱状試料を作製し, 0度と90度の2方向から高分解能観察を行った(図7参照)。Siの0.31 nmの結晶格子像が鮮明に観察できている。集束イオンビーム加工によって試料に導入されるダメージ層を低減するために, 最終仕上げ加工は, イオンビームを加速電圧10 kVにして行った。

5 おわりに

ここでは, 半導体デバイスから取り出した微小試料前処理法と, その試料内部構造の原子レベルの高分解能観察, および組成分布像観察を可能とする三次元ナノアナリシス技術について述べた。

この方法は加工装置と観察装置のシステムをベースとしているため, 加工と観察を繰り返し, しかも短時間で行うことができる。また, 試料形状を薄膜から柱状に変更することにより, 従来の二次元的な観察から三次元立体構造観察へ解析手法の改善を図ることができ, デバイス内特定局所領域からいっそう確実に多くの試料情報を取得できるようになった。

日立グループは, 今後も, スレーブットのいっそうの向上を目指し, 高精度の解析技術を開発していく考えである。



(a) 0度

(b) 90度

図7 Si単結晶基板の高分解能観察例

Si単結晶基板の0.1 mm角の柱状試料を作製し, 0度(a)と90度(b)の2方向から観察した高分解能像を示す。Siの0.31 nmの結晶格子像が鮮明に観察できる。

参考文献

- 平成9～13年度科学技術振興調整費知的基盤整備推進制度「三次元電子顕微鏡の研究開発」
- T. Ohnishi, et al.: 日本特許2774884および米国特許5270552
- 稲田, 外: 日本電子顕微鏡学会 第59回学術講演会発表予稿集 p. 13(2003)

執筆者紹介



矢口 紀恵

1986年日立製作所入社, 株式会社日立サイエンスシステムズ 那珂カスタマーセンタ 所属
現在, 電子顕微鏡応用技術の開発に従事
工学博士
日本顕微鏡学会会員
E-mail: yaguchi-toshie @ naka. hitachi-hitec. com



上野 武夫

1963年日立製作所入社, 株式会社日立サイエンスシステムズ 那珂カスタマーセンタ 所属
現在, 電子顕微鏡応用技術の開発に従事
工学博士
日本顕微鏡学会会員
E-mail: kamino-takeo @ naka. hitachi-hitec. com



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 設計・製造統括本部 那珂事業所 エレクトロニクスシステム第1設計部 所属
現在, 集束イオンビーム加工観察装置の開発に従事
日本顕微鏡学会会員
E-mail: onishi-tsuyoshi @ naka. hitachi-hitec. com



橋本 隆仁

1987年日立製作所入社, 株式会社日立ハイテクノロジーズ 設計・製造統括本部 那珂事業所 エレクトロニクスシステム第1設計部 所属
現在, 電子顕微鏡の開発に従事
日本顕微鏡学会会員
E-mail: hashimoto-takahito @ naka. hitachi-hitec. com



朝山 匡一郎

1983年日立製作所入社, 株式会社ルネサステクノロジ 生産技術部本部 解析技術開発部 所属
現在, 半導体加工プロセスの開発に従事
日本顕微鏡学会会員
E-mail: asayama. kyoichiro @ renesas. com