

サブナノメートル領域の故障解析を実現する半導体デバイス評価システム

New Semiconductor Device Evaluation System for Sub-nanometer Area Failure Analyses

上野 武夫 Takeo Kamino

梅村 馨 Kaoru Umemura

鍛示 和利 Kazutoshi Kaji

大西 毅 Tsuyoshi Ônishi

朝山 匡一郎 Kyôichirô Asayama



新開発の半導体デバイス評価システムを構成する集束イオンビーム加工装置“FB-2100”(a)と超薄膜評価装置“HD-2000”(b)

最高加速電圧40 kVのFB-2100と加速電圧200 kVのHD-2000を組み合わせた新開発の半導体デバイス評価システムでは、半導体デバイスの故障個所の探索からサブナノメートル領域の構造解析までを数時間で行うことができる。

半導体デバイスの急速な微細化、高機能化、高信頼化により、不良解析に用いられる観察技術(TEM, SEM)には、きわめて高度な空間分解能と操作性が求められている。これにこたえるため、日立グループは、集束イオンビーム加工装置と走査透過電子顕微鏡方式の超薄膜評価装置を組み合わせた「半導体デバイス評価システム」を開発した。

集束イオンビーム加工装置では、粗加工と仕上げ加工を両立させるために、加速電圧を10~40 kVの範囲で可変にした。超薄膜評価装置では、試料の構造情報と組成情報を多角的に取得するために、観察用

として明・暗視野透過電子検出器と二次電子検出器を、分析用としてエネルギー分散型特性X線検出器と実時間軽元素分布像観察装置をそれぞれ備える。これにより、原子レベルの微細構造観察と、サブナノメートル領域の軽元素分布像が実時間で観察できるようにした。試料ホルダは、両装置に共用できる。さらに、デバイス中の任意の解析個所から観察試料を直接摘出する「マイクロサンプリング法」の新たな開発により、100 nm以下の高位置精度での試料摘出からその評価までを、4~5時間で行えるようにした。

1 はじめに

半導体デバイスの評価装置には、プローブとして、さまざま

な粒子線が用いられている。いずれも、粒子線と材料との相互作用を利用して材料の構造や組成、化学結合状態などを調べるものであるが、粒子線の種類によって相互作用の内容や得られる情報が異なる。例えば、光を用いた観察は基板結

晶中の不純物探索に、高速イオンやX線を用いた分光法は基板・金属のヘテロジニアスな界面などの評価に、二次イオンを用いた分析法は微量不純物の分析に、そして、レーザー光を用いたラマン分光法は材料内部の応力解析などにそれぞれ応用されている。

しかし、それらのほとんどは空間分解能がサブマイクロメートルから数マイクロメートル程度にとどまることから、サブナノメートル領域の微細構造評価には、走査電子顕微鏡または透過電子顕微鏡が多く用いられている。中でも、原子レベルの高分解能観察が可能な透過電子顕微鏡は、100 nmプロセスの評価では最も期待が大きい評価装置の一つである。しかし、透過電子顕微鏡を十分使いこなすにはかなりの経験が必要であるため、簡単な操作で透過電子顕微鏡並みの分解能が得られるデバイス評価装置の開発が強く望まれている。また、透過電子顕微鏡レベルの高い分解能で構造評価を行うには、解析個所から薄膜試料を作製する必要がある。デバイスの薄膜試料作製に一般的に用いられてきた集束イオンビーム加工法では、薄膜加工の位置精度は200~300 nmが限界であり、100 nmノード以下の微細構造評価のための薄膜試料作製には適用が難しい。

ここでは、このようなニーズにこたえるために日立グループが開発した半導体デバイス評価システムの機能、特徴、および応用事例について述べる。

2 半導体デバイス評価システムの原理と装置構成

半導体デバイス内部の解析個所を特定して薄膜化するためには、まず、その場所を正確に知る必要がある。その最も一般的な方法は、集束イオンビーム加工装置内で加工中に

観察できる、走査イオン顕微鏡像を用いる方法である。しかし、この方法では、イオンビームをプローブとして用いるので、試料がイオンビーム照射損傷を受ける。このような走査イオン顕微鏡像観察の問題を解決する手段として、集束イオンビーム加工装置と薄膜評価装置を組み合わせた評価システムを開発した。

この評価システムの主な構成を図1に示す。

試料加工には集束イオンビーム加工装置“FB-2100”¹⁾を、観察には走査透過電子顕微鏡方式の超薄膜評価装置“HD-2000”をそれぞれ用いる²⁾。集束イオンビーム加工装置は、加速電圧を10~40 kVの広い範囲から選択できるようにした。40 kVでは迅速な粗加工が、10 kVでは清浄な仕上げ加工が可能で、これらを組み合わせることにより、清浄な薄膜を迅速に作製できるようにした。

また、バルク試料から数マイクロメートルの厚さの微小試料片(マイクロサンプル)を直接摘出するための「メカニカルプローブ」を新たに装備した³⁾。このメカニカルプローブの操作は高倍率二次電子像を観察しながら行えるので、初心者でも容易に試料を摘出することができる。これにより、これまで一般的に行われていた、精密カッタを用いる試料の切り出しを不要とした。

超薄膜評価装置には、加速電圧200 kVの高電圧冷陰極電界放出型電子銃を搭載した。これにより、厚さ数マイクロメートルのSiデバイス内部構造が明りょうに観察できるようになった。この装置の最小電子線プローブ径は原子レベルの高分解能観察ができる約0.2 nmとし、高性能透過電子顕微鏡と同等の微細構造解析を可能にした。また、試料から構造、組成および状態に関する情報をできるだけ多く引き出すために、明視野像用と暗視野像用の2種類の透過電子検出器と、二次電子検出器の計3個の検出器を備えた。

さらに、分析用として、特性X線検出器と、実時間軽元素

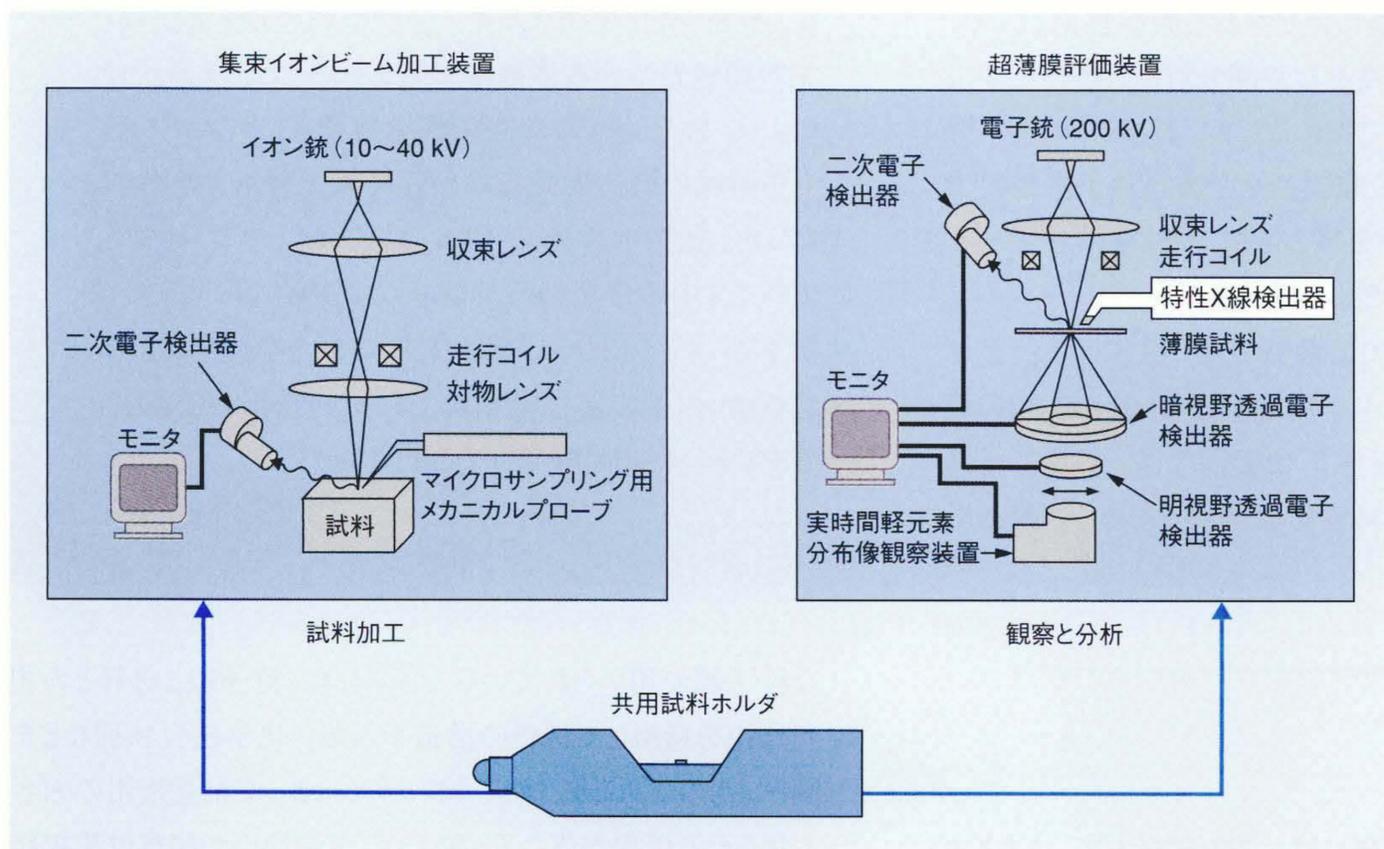


図1 集束イオンビーム加工装置と走査透過電子顕微鏡方式の超薄膜評価装置を組み合わせた半導体デバイス評価システムの概略構成

この半導体デバイス評価システムでは、100 nmノードへの対応が可能な試料作製機能と、構造・組成解明機能を備えた共用試料ホルダを用いる。

分布像観察装置を備えた。これらの集束イオンビーム加工装置と超薄膜評価装置は、両装置に挿入できる共用試料ホルダによって連結されているので、加工と観察を繰り返し行うことができる。

以上の装置構成から成る評価システムを完成することにより、100 nm以上の高い位置精度での迅速な薄膜試料作製と、サブナノメートルオーダー以下の極微小領域の構造、組成、および状態分析を可能にした。

3 試料作製と観察

3.1 解析個所からの試料摘出(マイクロサンプリング法)

この評価システムの集束イオンビーム加工装置を用いた試料摘出法(マイクロサンプリング法)の手順概略を図2に示す。最初に、集束イオンビーム加工時の試料汚染や損傷を防ぐため、解析個所の上に金属デポジション(沈着)を施す[同図(a)の矢印]。次に、解析個所周辺を溝加工する[同図(b)]。その後、試料を傾斜させ、解析個所底部を切除する[同図(c)]。さらに、マイクロサンプル運搬用メカニカルプローブを解析個所上部に接触させ、これを金属デポジションによって接着する[同図(d)]。メカニカルプローブの接着後、未加工部を切除し、マイクロサンプルを摘出する[同図(e)]。マイクロサンプルの大きさは、通常、幅が10~15 μm、厚さが3~5 μm、深さが10~15 μmであり、摘出所要時間は約1時間である。

上述の方法で加工したDRAM(Dynamic Random Access Memory)のマイクロサンプルを図3に示す。試料は約5 μm角のピラー状に加工し、先端を平たんに加工した円

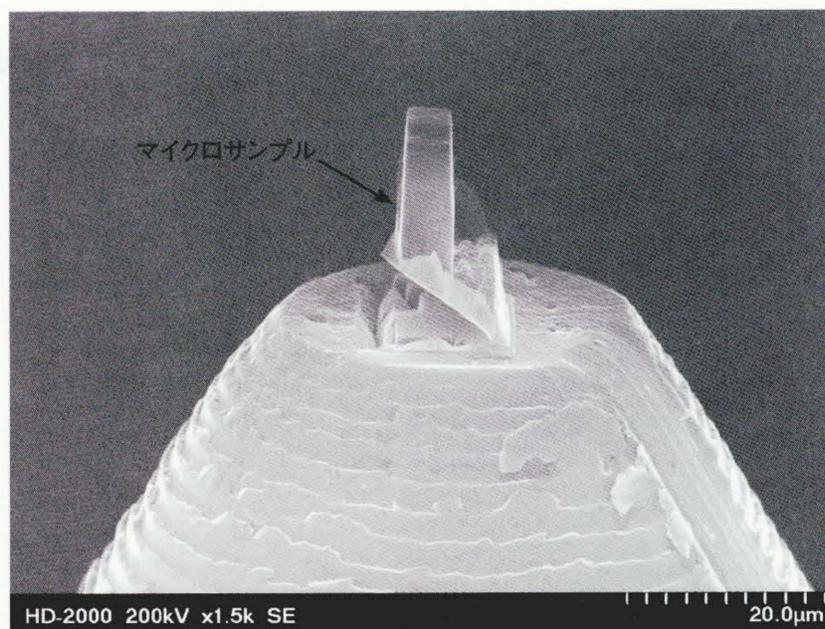


図3 5 μm角のピラー状に加工したDRAMのマイクロサンプル

円すい状の試料ステージ先端にマイクロサンプルを固定することにより、全方位から断面を観察することができる。

すい状の試料ステージに固定してある。そのため、全方位からの断面観察がしやすく、故障個所を短時間に探し出すことができる。

3.2 マイクロサンプルの観察

走査透過電子像は、多段の透過像拡大レンズを持つ透過電子顕微鏡の像と比べて色収差の影響が少ない。このため、透過電子顕微鏡よりも厚い試料の観察ができる。この評価システムでは、その走査透過電子顕微鏡の特徴を利用した故障個所の探索を行っている。約2 μm角のピラー柱状に加工したDRAMのマイクロサンプルを加速電圧200 kVで観察した走査透過像と二次電子像を図4に示す。これらは同じ試料を同じ方向から観察したものであるが、それぞれ異なった

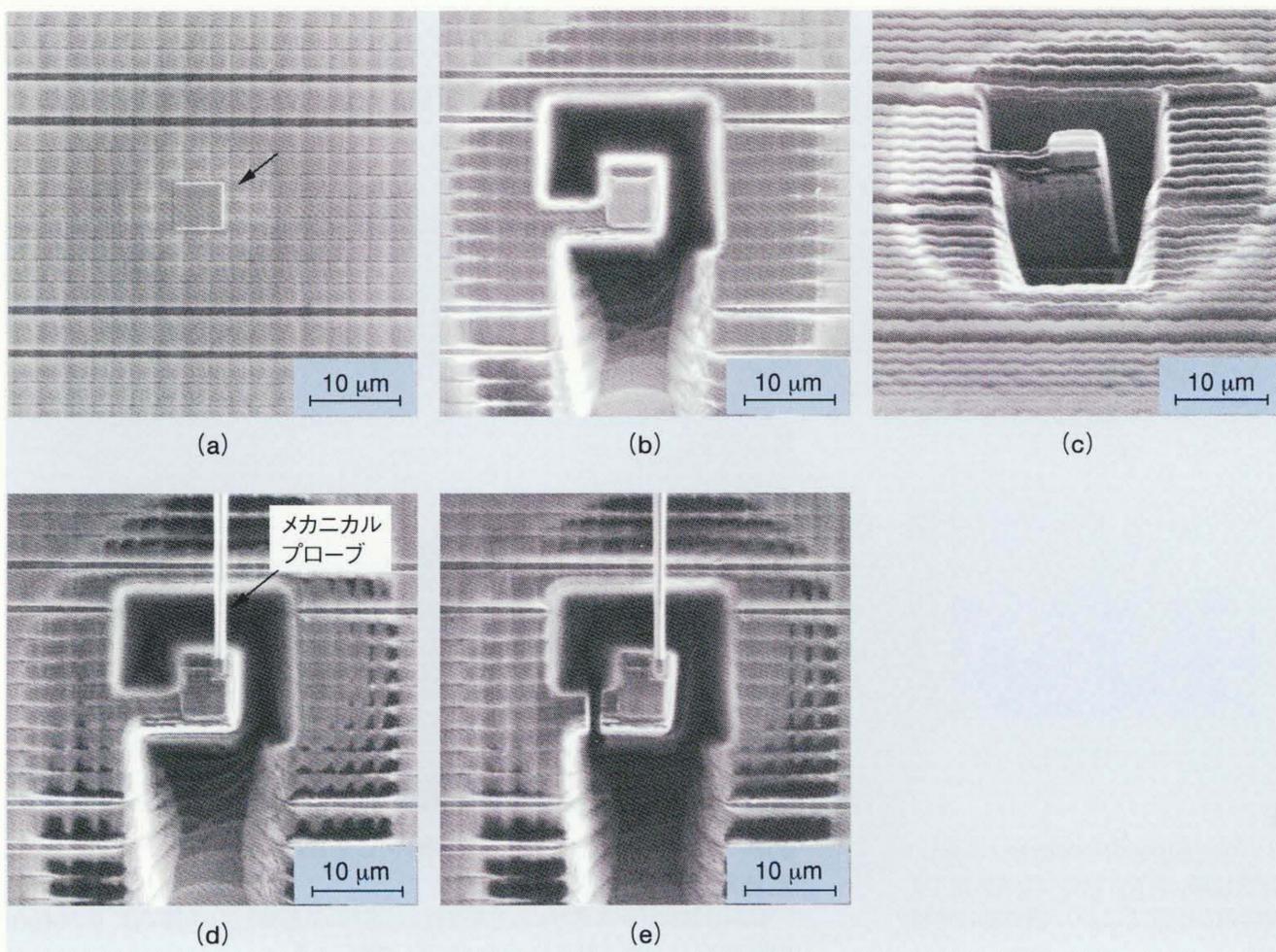


図2 解析個所からの試料摘出手順(マイクロサンプリング法)

数ミリメートル角に切り出した半導体デバイスから、解析個所を含む微小試料(マイクロサンプル)を直接摘出する。集束イオンビームの走査形状を変えることにより、さまざまな形状の試料が摘出できる。

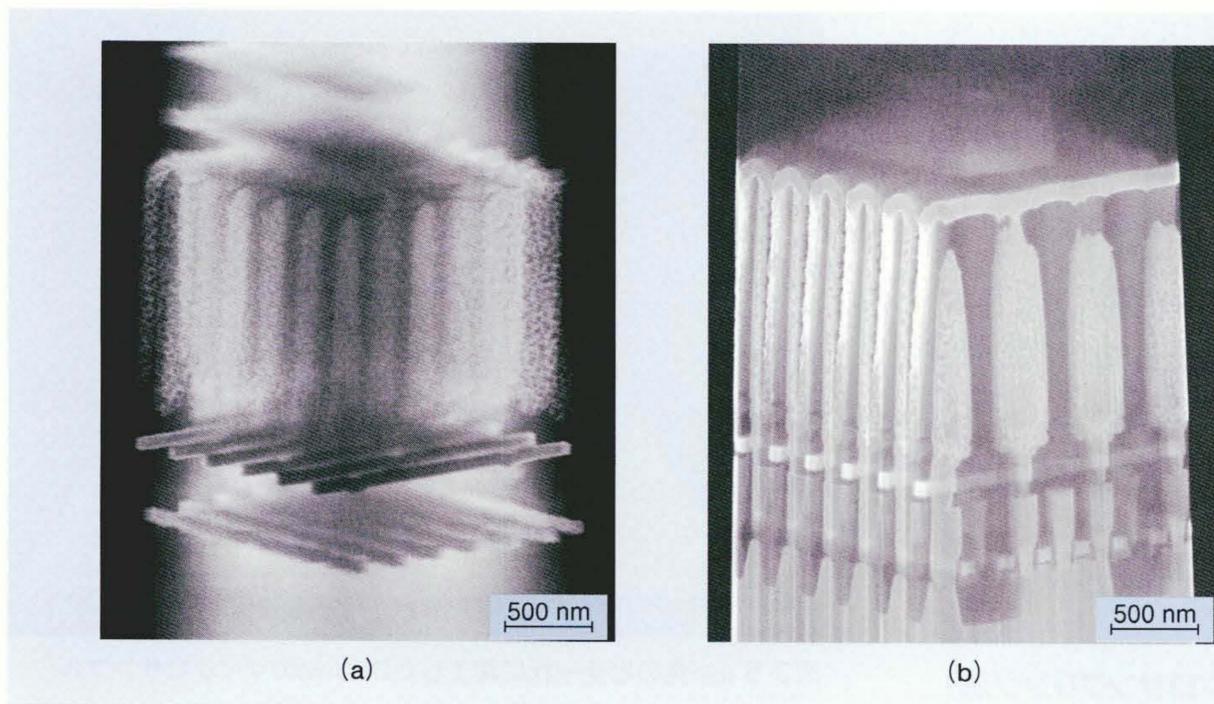


図4 2 μm 角のピラー状に加工したDRAMマイクロサンプルの走査透過像(a)と二次電子像(b)

(a)の走査透過像ではキャパシタの微細構造や2段の配線が、(b)の二次電子像では90度異なった2方向からのキャパシタ断面構造がそれぞれ立体的に観察できる。

情報が得られる。走査透過像ではキャパシタの微細構造と上下2段に配置された配線の位置関係が、二次電子像では90度異なった方向から見たキャパシタ、配線およびコンタクトの断面微細構造が、それぞれ立体的に観察されている。故障解析の場合は、このような厚い試料の観察から開始し、故障個所の追加工と観察を交互に行いながら、解析を進める。

3.3 解析個所の探索とその薄膜加工法

故障個所がサブミクロン以下の小さな構造の場合は、その個所を見失わずに、しかも、イオンビーム照射損傷を与えずに薄膜加工しなくてはならない。これは、通常のイオンビーム加工法ではきわめて困難な作業である。この評価システムは、そのようなニーズにこたえることを目的として開発したものである。その方法の概念を図5に示す。図4に示した観察で故障個所のおおまかな位置が判明したら、試料を厚さ3~5 μm に加

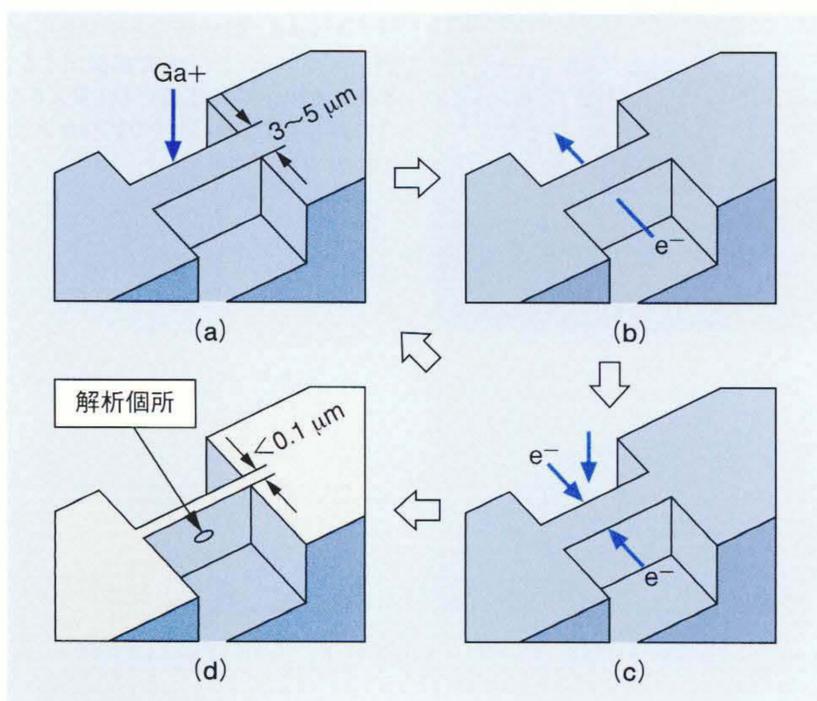


図5 解析個所の探索と薄膜加工手順

数マイクロメートルの厚さに加工した試料(a)を走査透過電子顕微鏡に移動し、解析個所の位置設定を行う[(b), (c)]。位置設定後、マイクロサンプルを集束イオンビーム加工装置に戻し、加工する。これを繰り返し行うことにより、最終的に解析個所を0.1 μm 以下まで薄くする[(d)]。

工する[図5(a)]。加工後、試料を超薄膜評価装置に移動し、走査透過像観察[同図(b)]と両断面の二次電子像観察[同図(c)]を行い、さらに詳しく故障個所の特定を行う。その後、試料を再び集束イオンビーム加工装置に戻し、追加工を行う。このような集束イオンビーム加工と走査透過電子顕微鏡観察を繰り返し、最終的に解析個所を0.1 μm 以下の厚さに薄膜化する[同図(d)]。

3.4 薄膜試料の微細構造観察

上述の方法で作製したDRAMゲート部薄膜試料の高分解能走査透過像観察例を図6に示す。試料の厚さは約60 nmで、観察は加速電圧200 kVで行っている。Si基板結晶の(110)面に電子線を垂直に入射しており、Si基板内には間隔0.314 nmのSi(111)面の結晶格子像が鮮明に観察されている。また、同様の間隔を持つ結晶格子像がゲート(多結晶)部にも鮮明に観察されている。一般に、集束イオンビーム加工法で作製した薄膜試料はイオン照射損傷を受け、原子



図6 評価システムを用いて薄膜化したSiデバイスゲート部の高分解能走査透過像観察例

試料は約60 nmの厚さにまで薄膜化してある。Si基板とゲート部では、0.314 nm間隔のSi(111)面の結晶格子像が鮮明に観察できる。

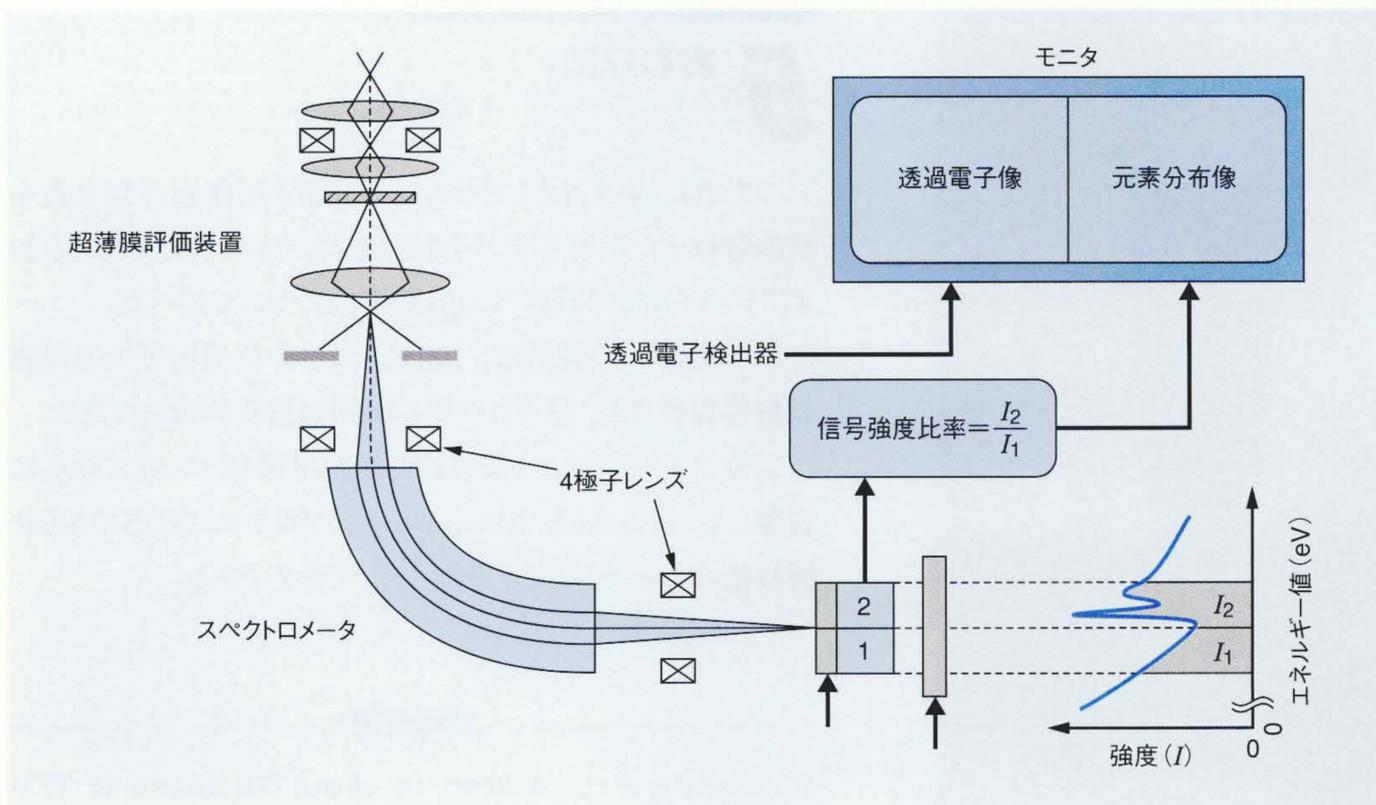


図7 実時間軽元素分布像観察装置の概略構成

スペクトロメータの後方に2個の電子検出器を備えることにより、実時間での元素分布像観察を可能にしている。

レベルの高分解能観察は困難と言われてきたが、この評価システムを用いて作製した試料は損傷なく薄膜化されている。

3.5 実時間軽元素分布像観察機能

半導体デバイスの解析では、酸化膜や窒化膜で構成される絶縁膜の形状や厚さの評価は不可欠である。絶縁膜の観察にはエネルギー分散型のX線分光器や電子線エネルギー損失分光器が用いられるが、それらの方法では、1枚の画像観察に数十分以上の時間を要する。その解決手段として、実時間軽元素分布像観察装置を開発した(図7参照)。この

装置では、選択した元素からの電子線信号と背景の信号を同時に取り込めるように、スペクトロメータ(分光計)の後方に2個の電子検出器を備えている。それらの信号強度比率($\frac{I_2}{I_1}$)を輝度信号に変え、走査電子線に同期させて表示する機能により、実時間での軽元素分布像観察を可能にした。この装置の開発により、1枚の元素分布像観察に要する時間を、従来の数分の1から数十分の1に短縮した。

3.6 絶縁膜の観察

実時間軽元素分布像観察装置を用いてSiデバイス中の絶縁膜を観察した例を図8に示す。この観察では、試料入射電子線を走査しながら、酸素—窒素—酸素と取り込みの元素を変えている。SiO膜—SiN膜—SiO膜の形状、厚さ、および相互の位置関係が明りように観察されている。観察に要した時間は80秒である。

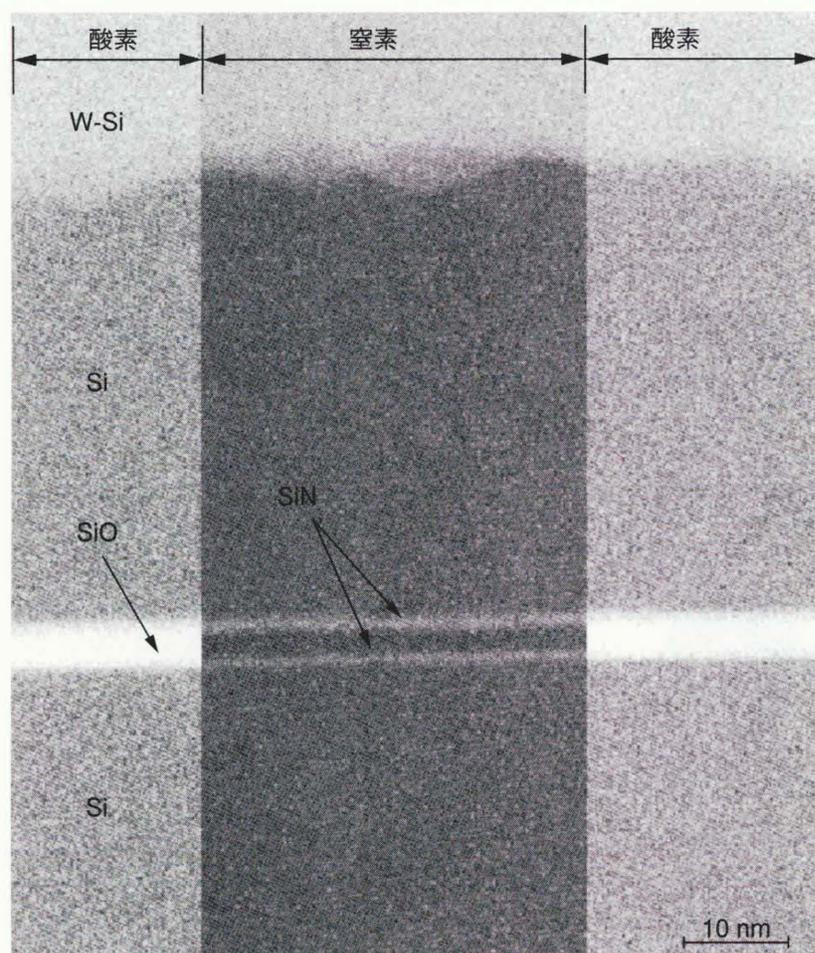


図8 実時間軽元素分布像観察装置を用いて観察した絶縁膜の例
試料入射電子線を走査中に、酸素、窒素、酸素と取り込みの元素を変えている。SiO膜とSiN膜の形状や厚さが鮮明に観察できる。

4 実デバイスへの応用

この評価システムを、日立製作所のSHマイコンのCoSi拡散層の微細構造評価に応用した。CoSi拡散層近傍の低倍率断面走査透過像を図9に示す。試料の厚さは約0.5 μmと薄くしてある。その拡大像を図10に示す。CoSi拡散層直下のSi基板内部に異常コントラストが現れている。この部分を保存した状態で試料を約60 nmの厚さまで薄膜化し、高倍率断面走査透過像を観察した(図11参照)。Si基板内には、0.314 nm間隔のSi(111)面の結晶格子像が鮮明に観察されている。この高分解能走査透過像の観察により、CoSi拡散層下部の異常コントラストが結晶欠陥に起因することと、結晶欠陥はSi(111)面上に発生しており、その長さが約20 nmであることを明らかにした。

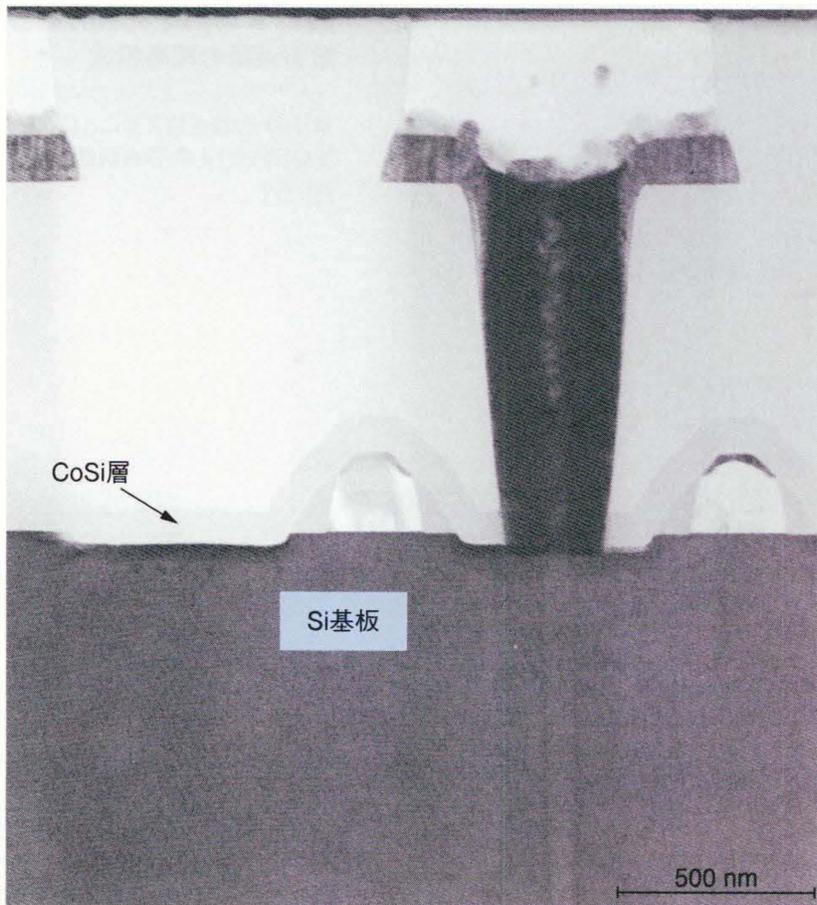


図9 低倍率断面操作によるSHマイコンの透過像の例
Si基板上部の暗い層がCoSi拡散層である。

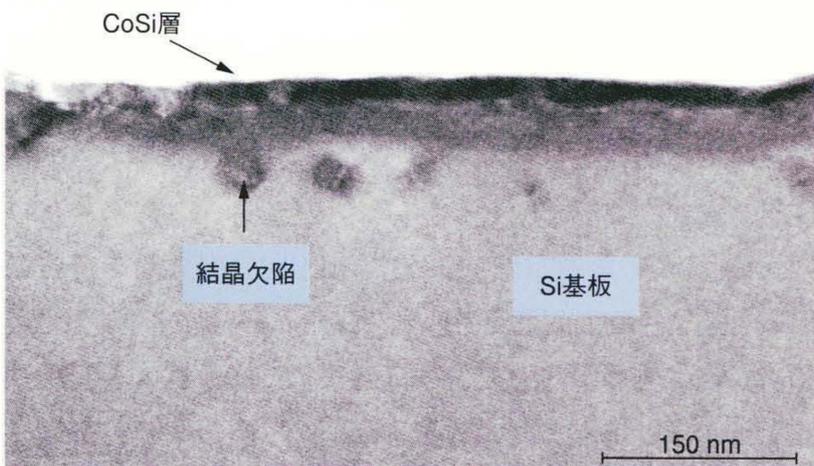


図10 SHマイコンのCoSi拡散層の断面走査透過像
CoSi拡散層直下のSi基板内部に異常なコントラストが現れている。

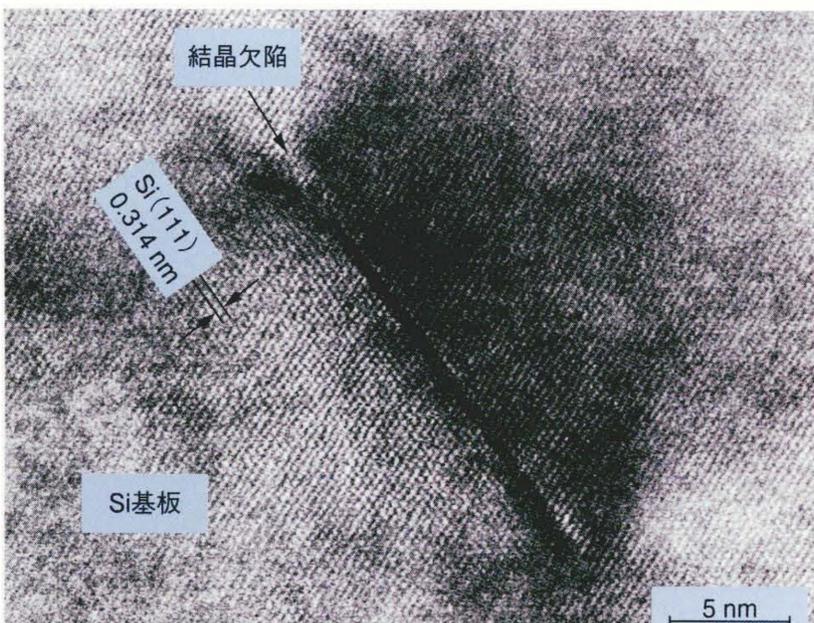


図11 CoSi拡散層直下のSi基板内部に発生した結晶欠陥
欠陥はSi(111)結晶面上に発生しており、その長さが約20 nmであることを明らかにした。

5 おわりに

ここでは、集束イオンビーム加工装置と超薄膜評価装置を組み合わせた半導体デバイス評価システムの機能、特徴、およびデバイス故障解析への応用事例について述べた。

このシステムの特徴は、100 nm以下の位置精度での薄膜試料作製機能と、原子レベルの微細構造解析機能である。

日立グループは、今後も最先端の半導体デバイス製造に貢献していくために、100 nm以下のプロセスに対応できる評価技術のいっそうの向上を図っていく考えである。

参考文献

- 1) T. Kamino, et al. : A Newly Developed FIB System for TEM Specimen Preparation, Microsc. Microanal. 8(2002)
- 2) T. Kamino, et al. : Recent Development in Failure Analysis in an Ultra Thin Film Evaluation System, Microsc. Microanal. 6(2000)
- 3) 上野, 外:FIBを用いたナノテク材料のピンポイント解析, 表面技術, 第53巻, 第12号(2002)

執筆者紹介



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
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



梅村 馨

1982年日立製作所入社, 中央研究所 先端技術研究部 所属
現在, 計測技術の開発に従事
日本顕微鏡学会会員
E-mail: umemura@crl.hitachi.co.jp



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



鍛示 和利

1986年日立製作所入社, 日立研究所 電子材料研究部 所属
現在, 電子線計測技術の開発に従事
応用物理学会会員
E-mail: kkaji@gm.hrl.hitachi.co.jp