

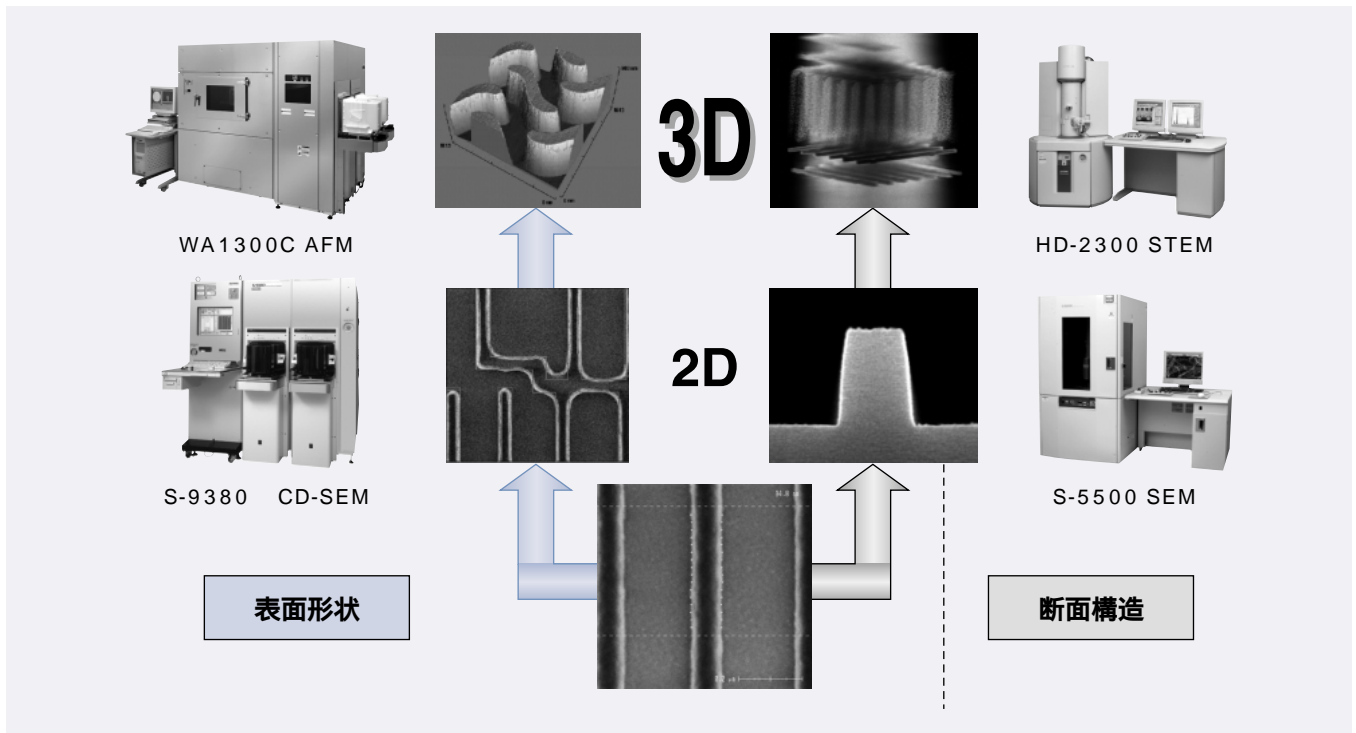
# 半導体デバイスへの三次元検査解析の現状と展望

## 新計測・解析技術によるSmart Root Cause Analysisへの取り組み

### Current Status and Future Prospects of 3 Dimensional Inspection and Analysis for Semiconductor Devices

杉本 有俊 Aritoshi Sugimoto  
見坊 行雄 Yukio Kenbô

渡辺 健二 Kenji Watanabe  
矢口 紀恵 Toshie Yaguchi



注:略語説明 AFM( Atomic Force Microscope ), CD-SEM( Critical Dimension Scanning Electron Microscope ), STEM( Scanning Transmission Electron Microscope )

#### Smart Root Cause Analysisを実現する評価解析用装置システム

半導体微細構造パターン寸法をインライン計測するCD-SEM, 平面構造から立体構造形状の高精度計測に活用が期待されるAFM, 計測対象パターンをピンポイントで切り出し、高倍率観察, 計測を実現する高分解能SEM( 走査型電子顕微鏡 )とSTEM( 走査透過電子顕微鏡 )を示す。

近年, 半導体デバイスの構造はますます微細化するとともに, 立体化・多層構造化が進んでいる。その結果, 従来の計測技術では対応できなくなってきており, 欠陥検査では単純に解釈のできない課題が浮き彫りになりつつある。

これらの課題に対応するために, 株式会社日立ハイ

テクノロジーズは, 計測・検査・解析装置のラインアップでソリューションの開発を進めている。

特に, 年々複雑化するLSIの構造に対して, 評価解析の最終目的である不具合の原因究明を合理的に進め, 評価解析の効率化だけでなく, 不具合の究明や, 不具合対策の効率化を図っている。

## 1 はじめに

半導体集積回路 (LSI) の早期開発や, 歩留りの向上, 信頼性の向上には, 目的に応じた評価解析装置を活用することが必要であり, この特集で詳述するように, 日立グループでは, 最先端LSIの評価目的に応じて評価解析用装置システムを提供している。

株式会社日立ハイテクノロジーズは, 年々複雑化するLSIの構造に対して, 評価解析の最終目的である不具

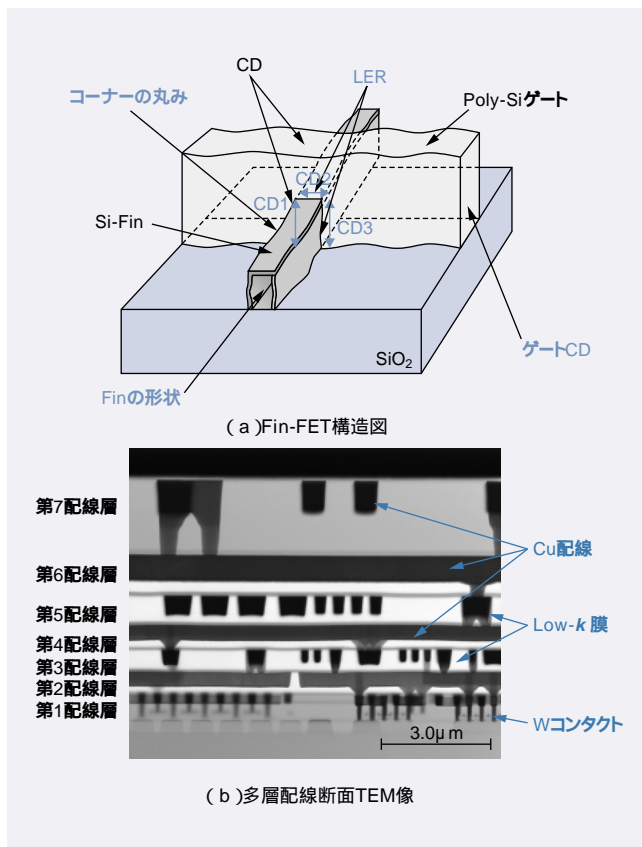
合の原因究明を合理的に進める' Smart Root Cause Analysis 'を提唱し, 精力的に開発している。Smart Root Cause Analysisの実現により, 評価解析の効率化だけでなく, 不具合の究明や, 不具合対策の効率化が期待できる。

ここでは, 株式会社日立ハイテクノロジーズが推進しているSmart Root Cause Analysisの一つである三次元検査解析について, その概要と展望について述べる。

## 2 半導体デバイスへの三次元検査解析のニーズ

典型的なFin-FET( Fin-Field Effect Transistor )の構造例を図1に示す。SiO<sub>2</sub>上に形成された単結晶Si( シリコン )により電流の流れるチャネル( Fin )を形成し、これをまたぐような形でゲート電極が形成されている。これは、微細化に伴う短チャネル効果を抑制できるなど、優れた特徴を持つデバイス構造であり、32 nmテクノロジーノード以降、従来のプレーナ構造にとって代わる可能性を持っている<sup>1)</sup>。

ゲート電極寸法は、トランジスタの性能を決める重要なパラメータであり、CD-SEM( Critical Dimension Scanning Electron Microscope )などで高精度に計測されている。微細化に伴い、従来のプレーナ構造でも、ゲート電極寸法や側壁角などの計測ニーズも高まっている。Fin-FETは立体構造デバイスであり、トランジスタ性能を制御するためには、より多くの形状と寸法を計測し、制御する必要がある。ゲート電極寸法一つを取っても、チャネルに沿った各部での寸法値が必要であり、チャネル自体の寸法として、幅、高さ、角の丸みなどを計測する必要があり、それぞれの実寸法も、ゲート電極幅で



注:略語説明 LER( Line Edge Roughness ), CD( Critical Dimension )  
TEM( Transmission Electron Microscope )

図1 デバイスの三次元解析ニーズ  
Fin-FET( Fin-Field Effect Transistor )構造図( a )、多層配線断面TEM像( b )を示す。

40 nm以下、チャネル幅が10 nm、高さが60 nmといった微細寸法のものが発表されている<sup>2)</sup>。

同じく、図1には多層配線構造デバイスの断面TEM( Transmission Electron Microscope )像も示したが、この事例のようにマイクロプロセッサなどでは7層どころか、10層、11層、さらには12層までもが発表されている。このような多層構造では、電気テストで故障を指摘されても、具体的にどここの場所に欠陥が存在するのかを特定するのは非常に難しくなっており、故障箇所情報に基づくピンポイント解析技術が必要となってきている。

## 3 三次元検査解析技術の現状

### 3.1 簡易多次元計測評価

#### (1) 計測

CD-SEMの分野では、従来の一次元代表寸法計測から二次元形状計測、ラフネス計測、三次元形状プロセスモニタなどの技術開発が進んでいる。最新装置S-9380IIと新計測システムの詳細は別論文で述べる。

#### (2) 表面欠陥の凹凸判定

ウェーハ表面検査装置「LSシリーズ」、暗視野形ウェーハ外観検査装置「ISシリーズ」、検出欠陥をSEMでレビューする「RS-4000」では、検出した欠陥の凹凸判定機能を装備している。ウェーハ表面の欠陥が、盛り上がっているのか、陥没しているのかという凹凸判定は簡易三次元だが、不具合の原因究明には有用な情報となる。

### 3.2 三次元解析

#### (1) 表面構造の三次元計測( AFM )

試料の表面構造の三次元計測解析を最も微細に実現するのは、原子間力顕微鏡( AFM: Atomic Force Microscope )である。AFMは、試料表面形状をnmオーダの探針で原子間力を利用してトレースし、三次元形状を計測する装置である。LSIプロセス管理における三次元情報の重要性の増加に伴い、クリーンルーム内での非破壊LSI段差・平坦度・粗さ測定が必須になっている。日立建機ファインテック株式会社の「WAシリーズ」AFMは、これらのニーズに的確に応え、LSI各メーカーで稼働している<sup>3)</sup>。

日立グループは、装置とともに探針の開発にも力を入れている。材料研究所の技術を活用した日立協和エンジニアリング株式会社製のCNT( Carbon Nano Tube )探針は信頼性・寿命が高く、精度の高いステップイン方式との相性も良く、安定した高精度計測を実現している。CNT探針によるレジストパターンの計測例を図2に示す。レジスト表面の微小形状をよくとらえている。

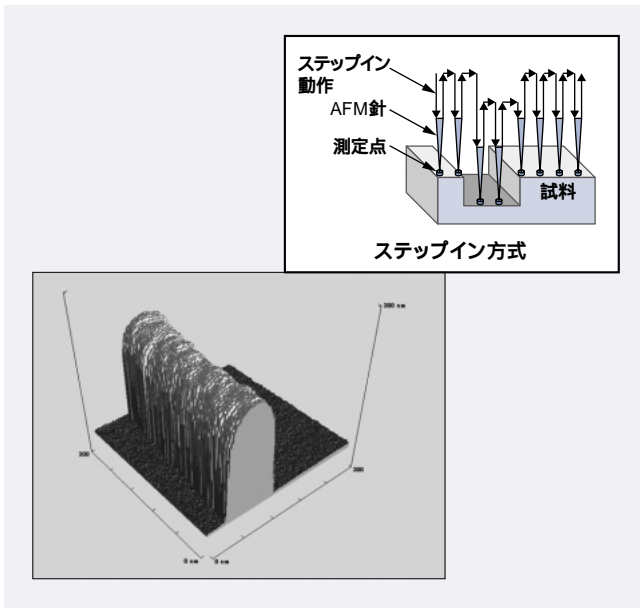


図2 AFMによるレジストパターン解析例  
ワイドエリアAFMにCNT(Carbon Nano Tube)探針を装着し、形状トレーサビリティの良いステップイン方式で測定する。

## (2) 内部構造の三次元解析(3D-STEM)

微細LSIの内部構造を解析するためには、走査透過電子顕微鏡(STEM:Scanning Transmission Electron Microscope)を用いる。この顕微鏡は直径1nm以下に絞った電子線を薄膜試料面上で走査させ、その透過像を観察するため、得られる像は、一般的に二次元に投影された像となる。しかし、これでは実際の三次元構造を重なり合った情報としてしか得ることができない。そこで、試料を薄膜ではなく柱状に加工し、多方向から観察することにより、直接三次元構造を観察することが可能となる。これには、集束イオンビームを用いたマイクロサンプリング法と、試料台を360度回転可能なFIB(Focused Ion Beam)STEM共用の三次元解析試料ホルダを用いる。マイクロサンプリング法は、ウェーハやチップ内の解析箇所を、集束イオンビームにより観察に適したサイズ、形状に切り出し、試料台に固定する方法である。切り出したSRAMの観察例を図3に示す。縦、横、高さがそれぞれ、 $2\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ の直方体に切り出したデバイスを斜め上方から観察した二次電子像(同図(a))では、加速電圧200kVの電子線を用いることにより、試料表面だけでなく、表面近傍の内部構造まで明瞭に観察できる。また、集束イオンビームで厚さをさらに $0.6\mu\text{m}$ まで薄く加工し、二次電子像(同図(a))に示した矢印方向AおよびBから観察した明視野走査透過電子顕微鏡像をそれぞれ同図(b)、(c)に示す。走査透過電子顕微鏡を用いることにより、 $8\mu\text{m}$ という厚さでも内部構造を観察できており、A方向からの観察だけでは困難な、上部2段のWプラグと3段目のWプラグとの位置の差が、B方向からの観察により把握できる。

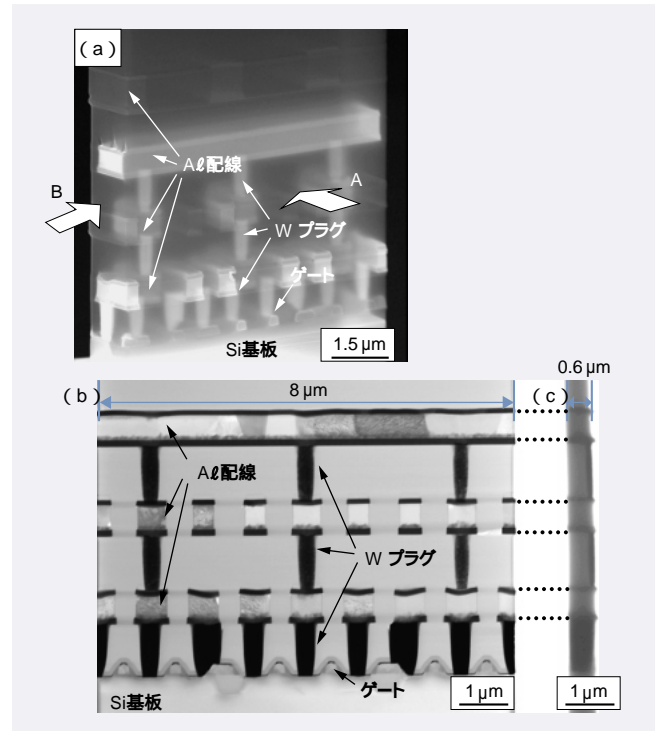


図3 走査透過電子顕微鏡を用いたSRAMの三次元解析例  
二次電子像(試料サイズ: $2\mu\text{m}\times 8\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ ) (a)、A方向から観察した明視野走査透過像(b)、B方向から観察した明視野走査透過像(試料サイズ: $0.6\mu\text{m}\times 8\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ ) (c)をそれぞれ示す。

## 4 三次元解析の例と三次元化の効果

今後のデバイス構造の微細化に加え、素子構造の三次元化が進めば、三次元評価技術は不可欠となる。例えば素子サイズが数十nm程度の場合、一般的な透過電子顕微鏡の試料厚さ100nmには、複数の素子構造が存在し、もはや二次元的な投影像では本来の三次元構造を正確に解析することは困難である。立体構造を持つFin-FETの模式図およびFin-FETの明視野走査透過電子顕微鏡像を示す(図4(a)、(b)、(c)参照)。既述のように、Fin-FETでは、トランジスタ特性を制御するため、多くのパラメータを計測する必要があるが、ここではゲート電極端部位置でのチャンネル断面形状の評価事例を示す。

まず、観察したい箇所を含むように、集束イオンビームを用いて200nm角の柱状試料を作製し、三次元解析ホルダの試料台に固定した。その後、直交する2方向から走査透過電子顕微鏡観察を行った。その際、チャンネル断面が明瞭に観察される領域を確認し、さらに、余分な領域を集束イオンビームにより除去し、試料サイズ $100\text{nm}\times 200\text{nm}$ のサイズにトリミングし、2方向から明視野走査透過電子顕微鏡観察を行った。A方向から観察した走査透過電子顕微鏡像(b)では、ゲートの形状およびサイズを把握することができる。しかし、この方向からではチャンネル部については高さが把握できるのみである。一方、

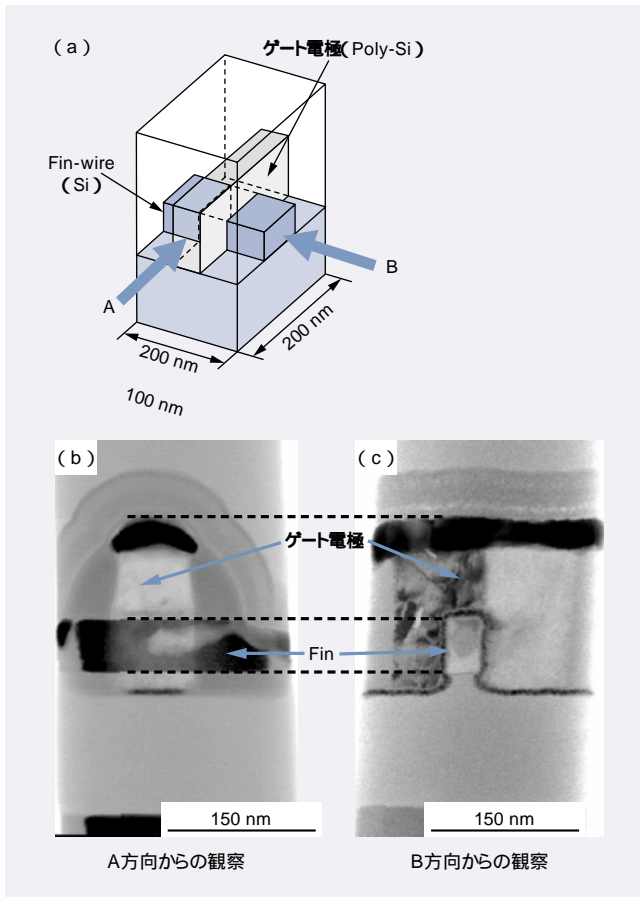


図4 Fin-FETの構造  
(a)模式図,(b)A方向から観察した明視野走査透過電子顕微鏡像,(c)B方向から観察した明視野走査透過電子顕微鏡像。試料サイズ:100 nm×200 nm

B方向からの観察により,(c)のようにチャネルの断面形状およびサイズを把握することができる。

今後,三次元構造を持つ素子の評価として,走査透過電子顕微鏡により多方向から観察する方法がますます重要になると考えられる。

## 5 おわりに

ここでは,三次元解析の概要と展望について述べた。LSIの微細化,多層構造化の評価解析に必要な三次元検査解析のハード技術は目覚ましい進歩を見せており,三次元検査解析による解析情報量は飛躍的に増加して

いる。

株式会社日立ハイテクノロジーズは,今後も膨大な情報量から不具合の究明や,対策に必要なかつ十分に活用可能な,解析情報に絞り込む情報処理技術を整備し微細化,多層構造化したLSIの不具合対策を容易,かつ迅速に対応するSmart Root Cause Analysisを提供していく考えである。

### 参考文献

- 1) プレーナCMOSを極限まで延命 次は立体トランジスタで勝負,日経マイクロデバイス(2005.8)
- 2) L. Witters, et al.:Integration of Tall Triple-Gate Devices with Inserted-TaxNy Gate in a  $0.274 \mu\text{m}^2$  6T-SRAM Cell and Advanced CMOS Logic Circuits, Symposium on VLSI Technology, p.106 (2005)
- 3) 小藪,外:半導体プロセス評価用インラインAFM(原子間力顕微鏡),日立評論,84,3,271-274(2002.3)

### 執筆者紹介



杉本 有俊

1979年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ 半導体製造装置営業統括本部 評価装置営業本部 アプリケーション/技術部 所属  
現在,計測評価装置のマーケティング,開発企画に従事  
応用物理学会会員,IEEE会員,SPIE会員  
E-mail:sugimoto-aritoshi@nst.hitachi-hitec.com



見坊 行雄

1975年日立製作所入社,日立建機ファインテック株式会社 開発製造本部 所属  
現在,AFMの開発に従事  
精密工学会会員  
E-mail:kembo00@hitachi-kenki.co.jp



渡辺 健二

1978年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ 那珂アプリケーションセンタ 所属  
現在,半導体計測検査解析応用技術開発に従事  
工学博士  
精密工学会会員  
E-mail:watanabe-kenji@naka.hitachi-hitec.com



矢口 紀恵

1986年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ 那珂アプリケーションセンタ 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