

超高分解能と高スループットの両立を実現する インレンズ型FE-SEM SU9600

土谷 美樹

1. はじめに

近年、ナノマテリアルや半導体デバイスの微細化が加速する中、それらの構造情報を高精度かつ高スループットで解析できる計測手法の重要性は一層高まっています。これに伴い、SEM 観察に対しては従来の高分解能観察に加えて、低加速電圧でのダメージ抑制や観察作業の効率化、取得データの安定性および再現性の確保など、多角的で高度な要求が求められるようになっていきます。日立ハイテックの超高分解能電界放出形走査電子顕微鏡 SU9600 (図1) は、これらの要求に応える次世代のフラッグシップモデルとして開発されました。冷陰極電界放出型 (Cold Field Emission: CFE) 電子銃とインレンズ型対物レンズ、E × B フィルターの組み合わせにより、安定的な高分解能観察を可能にします。さらに、カスタムレデューススキャン^{*1}や高精細キャプチャ^{*1}といった撮像機能の拡充、光学軸自動調整や自動化支援ソフト EM Flow Creator (EMFC)^{*1} による観察ワークフローの自動化により業務の効率性を向上できます。SU9600 はこれらの技術を組み合わせることで、世界最高レベル^{*2}の分解能と高いスループットを両立しています。



図1 超高分解能電界放出形走査電子顕微鏡SU9600

2. 特長

2-1. 日立独自技術が実現する高分解能観察

SU9600 は CFE 電子銃 (図2 (a)) を搭載しており、高輝度領域における安定した電子線照射を実現します。一次電子線のエネルギー幅が小さいため色収差が抑制され、スポットサイズの微小化に有効です。その結果、低加速電圧条件でも高い分解能での観察や画像取得が可能です。対物レンズ上には、直交する電界と磁界を形成する E × B フィルター (図2 (b)) が内蔵されており、一次電子線の軌道を保持しつつ、発生する二次電子を高効率に検出するよう設計されています。さらに、対物レンズは試料をレンズ内へ導入するインレンズ型を採用しているため、短焦点化による収差低減に有効であり、数ナノメートル以下の微細構造を明瞭に観察できます。これらの電子光学系や検出系の最適化により、SU9600 は加速電圧 30 kV において 0.4 nm の分解能を実現します。また、試料表面情報の取得や試料ダメージ低減を目的とした加速電圧 1 kV においても 0.6 nm^{*1*3} の高分解能を実現しています。図3 に GAA^{*4} トランジスタ断面を 100 万倍で観察した例を示します。ナノシート周囲のメタルゲート薄膜やコンタクトメタルが高分解能かつ高コントラストで観察できており、試料導入から画像調整まで短時間で容易に高倍率像の取得が可能です。

SU9600 は、微細化が進む半導体デバイスやナノ材料に対しては高分解能観察を、さらに軽元素主体の機能性材料・高分子材料や生体試料に対しては低加速・低プローブ電流による低ダメージ観察を提供します。

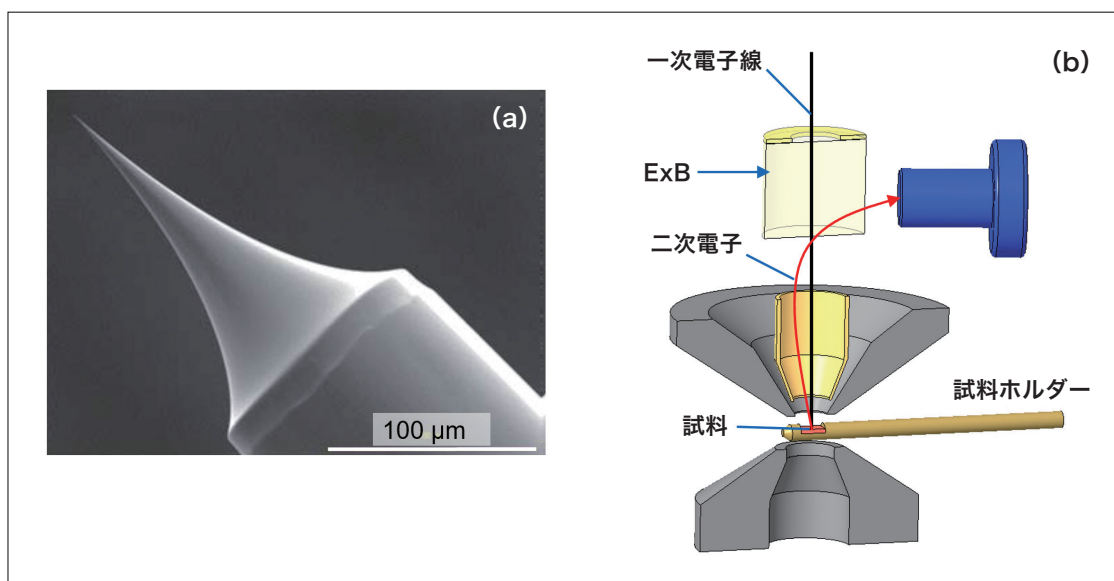


図2 (a)CFE電子銃先端 (b)インレンズ型対物レンズと試料、ExBフィルターの配置

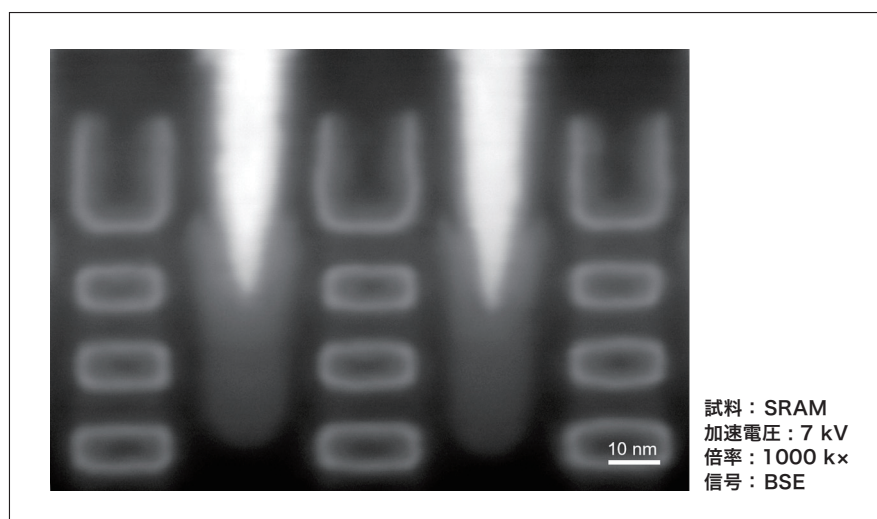


図3 高分解能観察例(GAA*4トランジスタ断面SEM像)

2-2. 多様な信号検出技術

SU9600は、二次電子や反射電子および透過電子など多様な信号検出に対応(図4)し、試料の特性や観察目的に応じて最適な観察モードを選択できます。Upper 検出器や Top 検出器^{*1}では、カラム内電極の制御により二次電子や反射電子の弁別が可能です。また、本装置は STEM 観察にも対応しており、明視野および暗視野信号を検出し、薄片試料の内部構造や結晶性、組成に起因したコントラスト情報を高い空間分解能で取得できます。新たに開発された反射電子検出器 VCD (Variable Crystal Detector: VCD)^{*1}は、反射電子像取得に特化したシンチレータ型検出器であり、応答速度の向上によって視野探しが容易になりました。これにより1フレーム当たり1秒未満の短いスキャン時間でも鮮明な画像を得ることができます。さらに、VCDは挿入位置を3段階で調整可能で、光軸上に挿入した場合には反射電子信号を、光軸から離れた位置では検出器方向に放出された反射電子信号を検出し陰影効果が得られます(図5)。後者の配置では、従来機種ではできなかった凹凸情報を強調した画像取得が可能です。

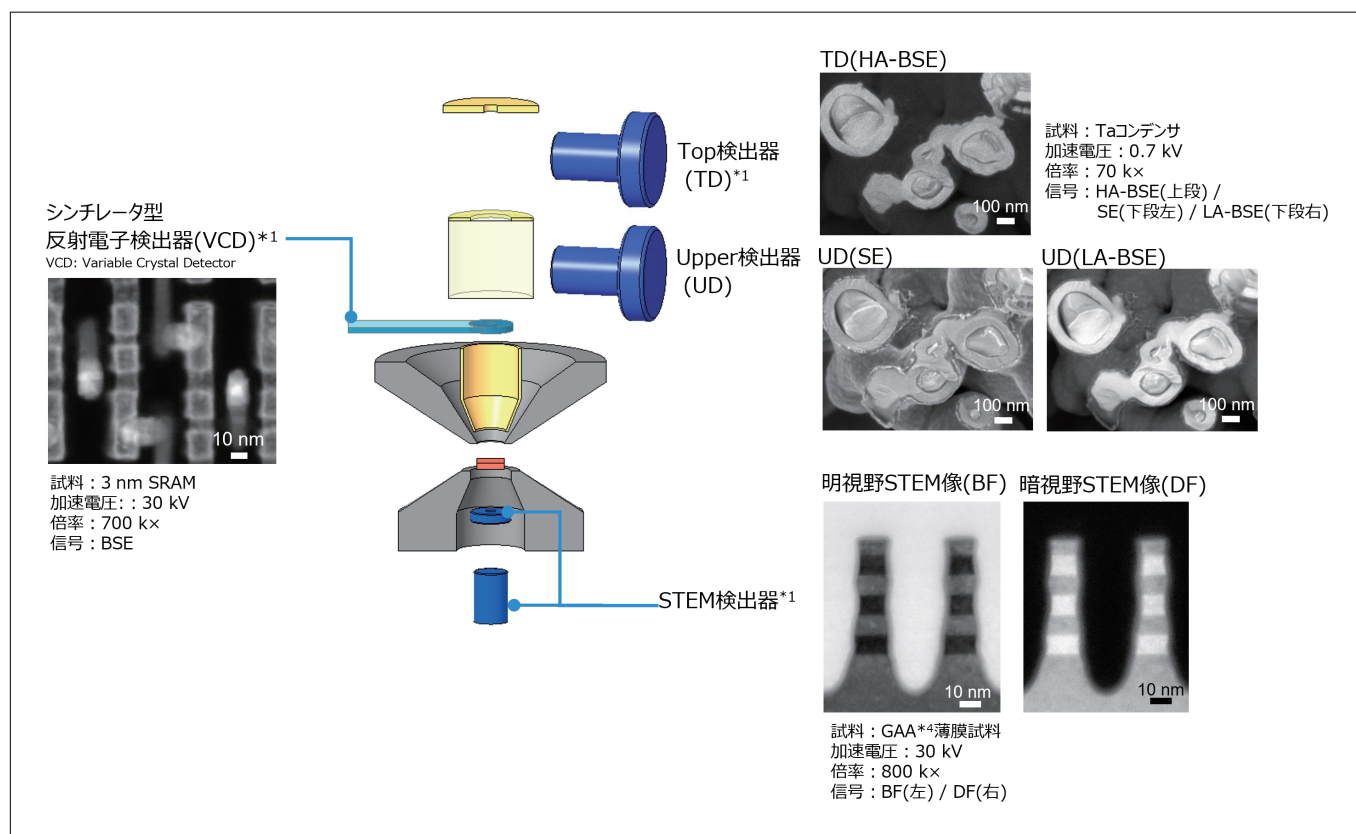


図4 SU9600の検出器配置

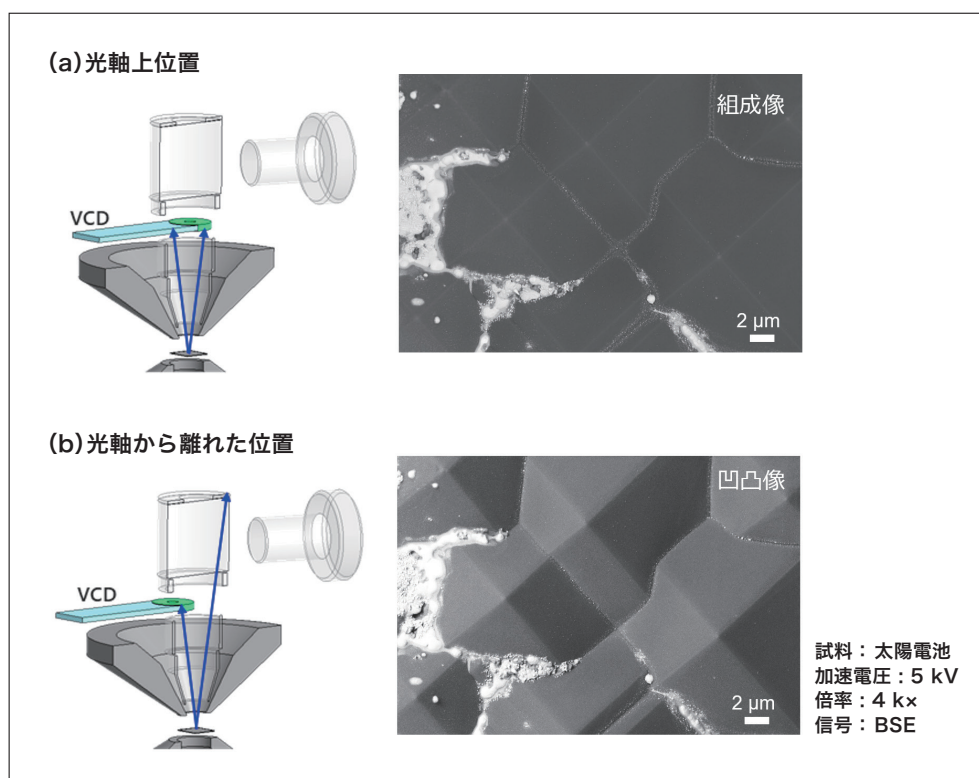


図5 VCD検出器の模式図と同一視野の画像

(a)光軸上挿入時の配置と組成像 (b)光軸から離れた位置の配置と凹凸像

2-3. 高解像度と効率性を両立する次世代撮像機能

本装置では、スキャン機能の拡充により観察および撮像の効率化を実現しています。カスタムスキャンでは、1画素のビーム滞在時間(Dwell time)を100ナノ秒から2ミリ秒の範囲で設定でき、さらにラインおよびフレーム積算にも対応します。従来のスキャン時間設定に加えて柔軟な条件設定が可能になり、短時間キャプチャやチャージアップの抑制、電位コントラストの最適化など、多様な観察に対応可能です。カスタムレデューススキャン^{*1}は、任意の領域のみをスキャンまたはキャプチャでき、対象領域外の走査時間を削減できます。さらに、カスタムスキャンを併用しDwell timeを短く設定することで、必要領域を短時間で取得することができます。高精細キャプチャ^{*1}は、最大40,960×30,720画素での画像保存に対応し、低倍率で取得した画像であってもデジタルズームにより微細構造を明瞭に観察することができます。カスタムレデューススキャンと高精細キャプチャを併用した事例を図5に示します。図5(a)は本組み合わせで取得した画像、(b)はそのデジタルズーム像です。デジタルズーム後も微細構造が明瞭に確認でき、測長に適した画像が得られており、(c)に示す従来の1,280×960画素の画像と比較しても、画質の差が明確に示されています。従来の広域撮像で必要だった視野移動と高倍率での複数撮像を省き、1枚で対象領域を取得できるため、SEMによる解析プロセスのTAT^{*5}短縮に寄与します。さらに、光学自動軸調整の自動化やルーチン作業を自動化するEM Flow Creator (EMFC)^{*1}、オートキャリブレーション機能^{*1}により、SEM観察業務のさらなる効率化と再現性向上が期待できます。

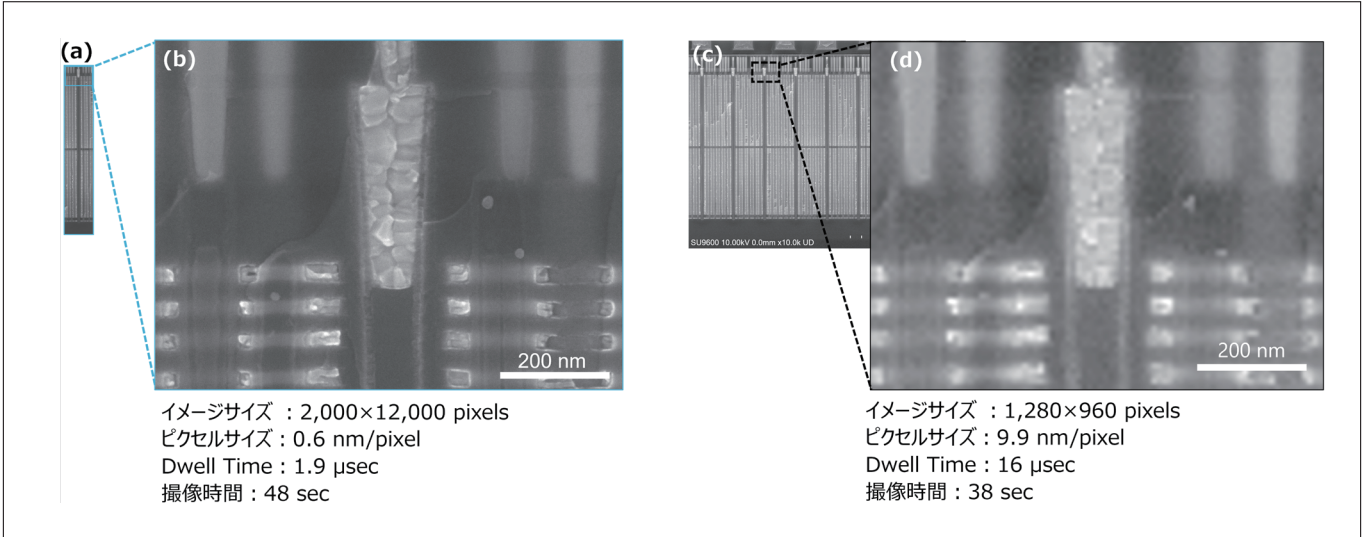


図6 カスタムレデューススキャンと高精細キャプチャの組み合わせによる画像取得
(a)カスタムレデューススキャンと高精細キャプチャを併用した画像
(b) (a)のデジタルズーム画像 (c)従来の1 k画像 (d) (c)のデジタルズーム画像

3. 主な仕様と装置機能

以下の表1はSU9600の主な仕様、表2は装置機能です。

表1 SU9600の主な仕様

項目		内容
二次電子分解能		0.4 nm (加速電圧30 kV)
		1.0 nm (加速電圧1 kV)
		0.6 nm (加速電圧1 kV) *1 *3
STEM 分解能*1	0.34 nm (加速電圧30 kV / 走査透過電子像による格子像)	
加速電圧	0.5 ～ 30 kV	
照射電圧*1 *3	0.01 ～ 20 kV	
試料ステージ可動範囲		X : ±4.0 mm, Y : ±2.0 mm, Z : ±0.3 mm, T : ±40°
最大搭載 試料サイズ	平面試料台	5.0 mm×9.5 mm×3.5 mm (高さ) (最大)
	断面試料台	2.0 mm×6.5 mm×5.0 mm (高さ) (最大)

表2 装置機能

項目		内容
倍率	低倍率モード*6	80 ～ 10,000×
	高倍率モード*6	800 ～ 3,000,000×
画像表示	画面表示モード	大画面表示モード 1,280×960 表示 1 画面表示モード 800×600 表示 2 画面同時表示モード 800×600 表示 4 画面同時表示モード 640×480 表示 6 画面同時表示モード 640×480 表示 (2 モニター使用時) 2 画面同時表示モード 1,280×960 表示 (2 モニター使用時)
	保存画素数	640×480, 1,280×960, 2,560×1,920, 5,120×3,840, 10,240×7,680, 20,480×15,360 *1, 40,960×30,720 *1
スキャン	モード	Rapidスキャン (Rapid1 ～ Rapid2 2種類) Fastスキャン (Fast1 ～ Fast2 2種類) Slowスキャン (Slow1 ～ Slow7 7種類) CSスキャン (チャージ抑制) (CSS1 ～ CSS7 7種類) カスタムスキャン (画素時間 : 50 Hz 時100 ns ～ 2 ms, 60 Hz 時80 ns ～ 1.6 ms) Reduceスキャン (High, Medium, Slow 3種類) Wideスキャン (High, Slow 2種類) ビームマーキングモード

4. まとめ

本稿では、日立新型 CFE SEM SU9600の主要な電子光学系，検出器構成，スキャン機能および自動化機能についてご紹介しました。CFE 電子銃やインレンズ型対物レンズおよび E × B フィルターを中心とした電子光学系により，高輝度で安定した電子線照射と低収差を両立し，広い加速電圧領域において高い分解能観察を実現します。また，多様な検出系と拡張されたスキャン機能および高精細キャプチャ機能に加え，自動化支援ソフトウェアや光学自動軸調整により試料特性に応じた柔軟な観察と効率的な撮像を可能にします。これらの特長を統合した SU9600は，卓越した観察性能で次世代デバイス開発やナノテクノロジー研究において高精度な構造解析を加速させ，開発サイクルの短縮や新材料の創出に貢献します。

- (*1) オプション
- (*2) 2025 年10月現在
- (*3) リターディングモード使用時
- (*4) Gate All Around
- (*5) Turn Around Time
- (*6) 127 mm ×95.25 mm を表示サイズとして倍率を規定

著者紹介

土谷 美樹
(株) 日立ハイテク コアテクノロジー&ソリューション事業統括本部 CTシステム製品本部 CTソリューション開発部