

球面収差補正機能を搭載した 走査透過電子顕微鏡「HD-2700」

Hitachi Spherical Aberration Corrected STEM "HD-2700"

中村 邦康 Kuniyasu Nakamura

田中 弘之 Hiroyuki Tanaka

小川 太郎 Taro Ogawa

稲田 博実 Hiromi Inada

今野 充 Mitsuru Konno

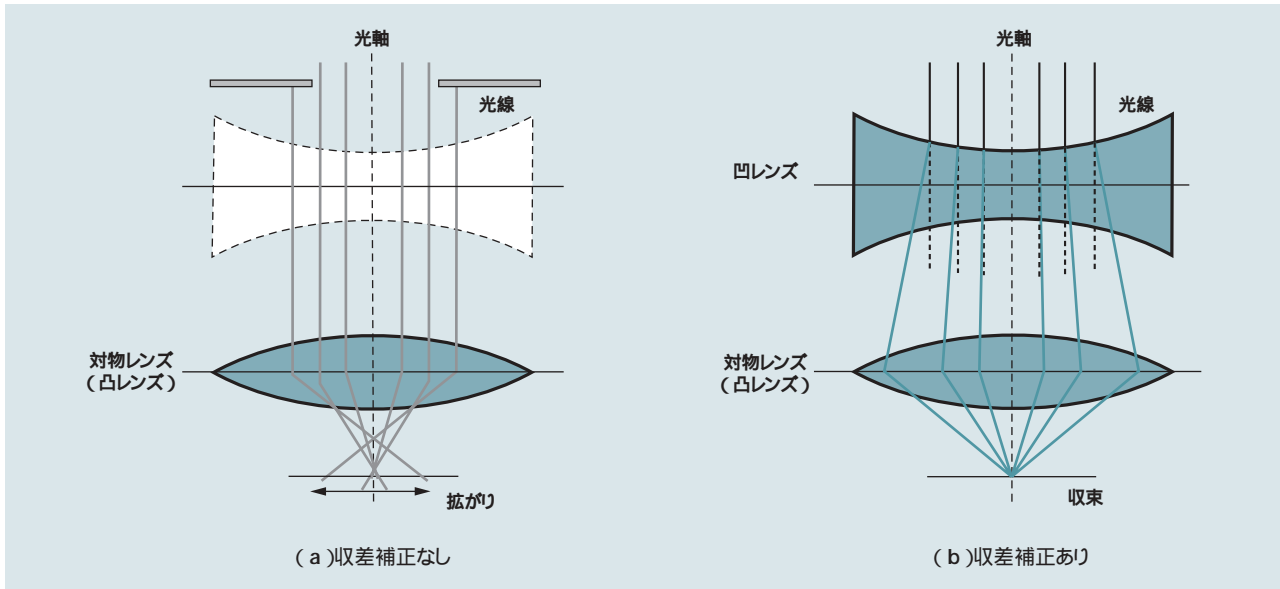


図1 球面収差による解像度低下の概念

STEM(走査透過電子顕微鏡)の分解能を改善するためには、対物レンズの球面収差を大幅に低減する技術が必要になる。

電子顕微鏡の技術者にとって、電子光学系で原理的に生ずる球面収差を補正し、分解能を飛躍的に向上させることは長年の夢であった。

株式会社日立ハイテクノロジーズは、球面収差補正器を搭載した次世代のSTEM(走査透過電子顕微鏡)を開発した。

球面収差補正器は一種の凹レンズとして作用し、電子光学系の球面収差を極限まで低減する。この結果、より大きな収束角でサブナノメートルの電子ビーム径が得られ、高分解能観察と高感度分析の両立が可能となる。

次世代の半導体や材料、ナノテクノロジーの研究開発を強力に支援する解析装置になるものと期待している。

1.はじめに

半導体をはじめとする電子デバイスは年々微細化、多層化し、原子レベルの構造や組成を解析して制御することが重要になっている。株式会社日立ハイテクノロジーズは、1998年にSEM(Scanning Electron Microscope:走査電子顕微鏡)並みの簡便な操作性とTEM(Transmission Electron Microscope:透過電子顕微鏡)に匹敵する解像度が得られるSTEM(Scan-

ning Transmission Electron Microscope:走査透過電子顕微鏡)「HD-2000」を発売し、好評を博してきた。

そして、今回、「HDシリーズ」のハイエンド機として、ドイツCEOS社と共同で、球面収差補正機能を搭載したSTEM「HD-2700」を開発した。

ここでは、STEM「HD-2700」の開発コンセプトと基本性能、電子デバイス解析への適用結果について述べる。

2.開発コンセプト

点光源を仮定した場合のSTEMの解像度限界 d は次式で近似される。

$$d=0.43 Cs^{1/4}$$

ここで、 Cs は対物レンズの球面収差係数、 λ は電子ビームの波長である。電子ビームの波長は加速電圧で決まり、HDシリーズSTEMの加速電圧200 kVでは波長が約0.0025 nmと十分に小さいが、対物レンズの球面収差が解像度を制限する要因となり、解像度限界は波長の70倍程度にしか到達できない。

球面収差による解像度低下の概念を模式的に図1に示す。

同図(a)のように対物レンズが球面の凸レンズの場合、レンズ中心付近の近軸を通る光線は像面で一点に収束するが、近軸から離れた光線は球面収差によって一点に収束せず、像面で拡散するが生じる。

電子顕微鏡に用いる回転対称の電磁レンズは原理的に凸レンズにしか成り得ないため球面収差が回避できず、その補正が長年の技術課題となっていた。直接的に球面収差を補正する方法として、凹レンズ作用を持つ多極子レンズを回転対称レンズと組み合わせる方法が1940年代から研究されており、近年そのハードウェアとしての実用性が研究レベルで実証された。

HD-2700では、新たにCEOS社と共同で開発した六極子型球面収差補正器を搭載し、球面収差補正の課題を克服した。球面収差補正器は同図(b)における凹レンズと同じように、近軸外の電子ビームを発散させる作用を有する。このため、球面レンズである従来の対物レンズと組み合わせることによって、近軸外の電子ビームも収束させることが可能になる。その結果、電子ビーム径(プローブサイズ)がさらに小さくなるとともに、より大きい収束角の電子ビームが利用できるため、プローブ電流を増大させることが可能となる。

収差補正器の構成を図2に示す。収差補正器は負の球面収差を発生させる2個の六極子レンズと、高次収差をキャンセルする2個のトランスファレンスを六極子レンズ間に設置した構造である。六極子レンズの強度を調整することによって電子光学系全体の球面収差をほとんどゼロに近い値まで低減できる。

HD-2700の外観を図3に示す。収差補正器はコンデンサレンズと対物レンズとの間に搭載されている。また、高分解能化に対応して新たに鏡体全体を覆うカバーを装備し、騒音や温度変化による像障害の影響を極力小さくしている。EDX

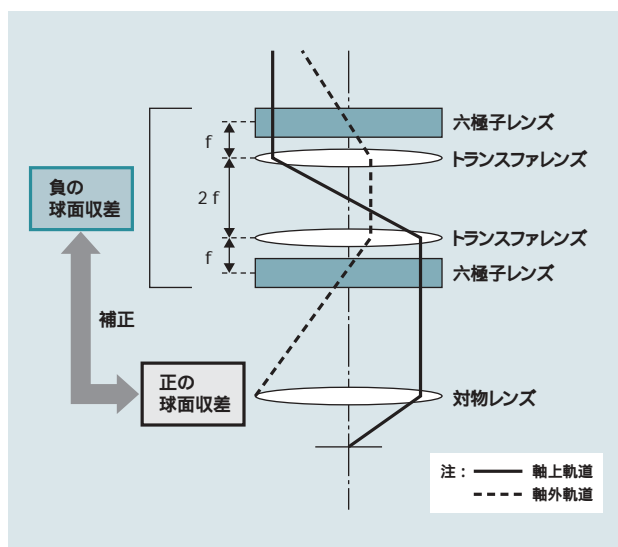


図2 収差補正器の構成

負の球面収差を発生させる2個の六極子レンズの間に、高次収差をキャンセルする2個のトランスファレンスを設置している。

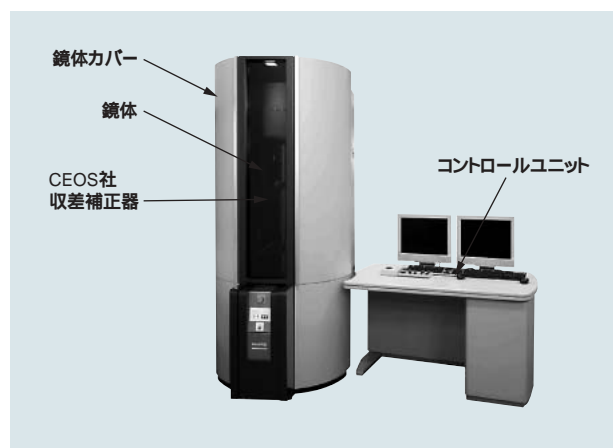


図3 HD-2700の外観

新形のSTEM「HD-2700」の外観を示す。

(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:エネルギー分散型X線分光法)、EELS(Electron Energy-Loss Spectroscopy:電子エネルギー損失分光法)などのアタッチメントが装着でき、従来の分析ユーティリティを損ねることはない。

なお、収差補正器の調整はGUI(Graphical User Interface)画面上から操作可能で、従来のHDシリーズSTEMの良好な操作性を極力損なわないように配慮されている。

3.基本性能

日立ハイテクノロジーズの従来STEMとHD-2700による金(100)結晶の暗視野STEM像と、そのパワースペクトルを図4に示す。従来STEMの場合、縦と横方向に0.2 nmの格子縞(じま)が観察され、回折パターンに相当するパワースペクトルにも、それに対応する(200)回折スポットが現れている。

一方、HD-2700の場合、STEM像がよりシャープになり、周期0.14 nmに対応する格子縞(パワースペクトルにおける(220)回折スポットに対応)が観察され、解像度限界の向上が確認される。

従来STEMとHD-2700でのプローブサイズとプローブ電流

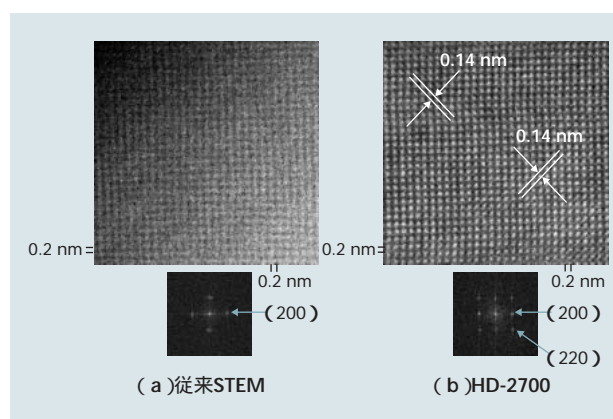


図4 金(100)結晶の暗視野STEM像

標準STEM(当社従来機)での暗視野像を(a)に、HD-2700での暗視野像を(b)に示す。下の図は、それぞれの暗視野像のパワースペクトルである。

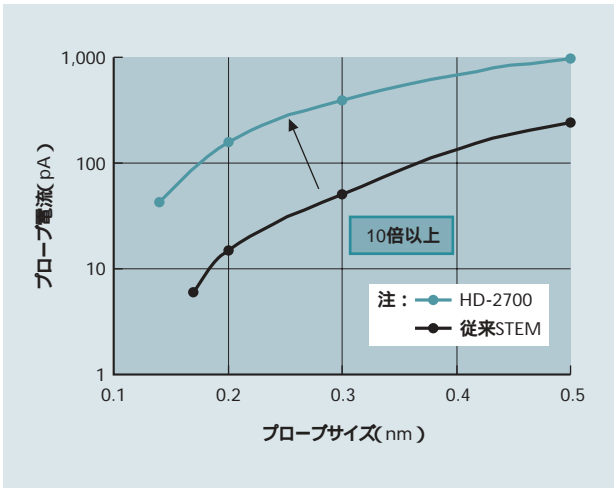


図5 プロブサイズとプローブ電流との関係
 プロブサイズは推定値、プローブ電流は実測値である。

との関係を図5に示す。HD-2700では、EDX分析で通常用いられる0.2 nmから0.3 nmのプロブサイズで一けた以上大きな電流値が得られることがわかる。

また、カーボン支持膜を貼った銅メッシュ上の金粒子をサンプルに用い、従来STEMとHD-2700で得られたEDXスペクトルを図6に示す。HD-2700では約一けた大きな特性X線のスペクトル強度が得られることが確認された。

4. 電子デバイス解析への適用

次に、HD-2700を実際の電子デバイス解析に適用し、その有用性を調べた結果について述べる。

明視野STEM像モードで観察したSi半導体デバイスの低倍率像、およびSi/SiO₂界面の高分解能像を図7に示す。Si結晶格子、SiO₂非晶質構造が明瞭に観察されており、ゲート絶縁膜の膜厚解析に有用であることが期待される。

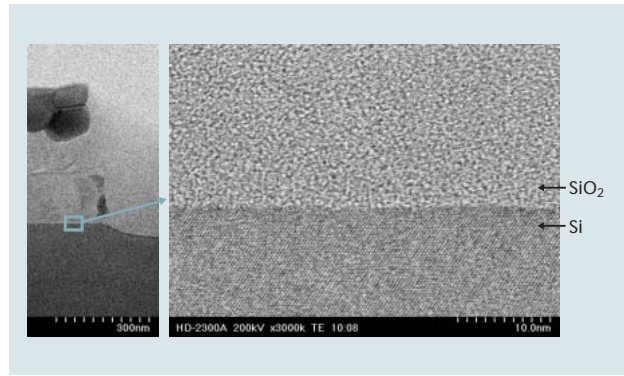


図7 Si半導体デバイス断面の明視野STEM像
 取り込み時間は10秒である。Si結晶格子やSiO₂非晶質構造がはっきりと観察されることから、ゲート絶縁膜の膜厚解析に期待されている。

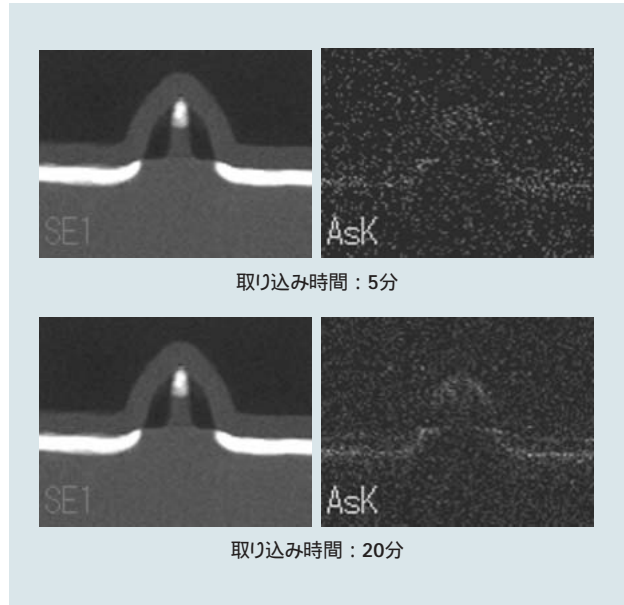
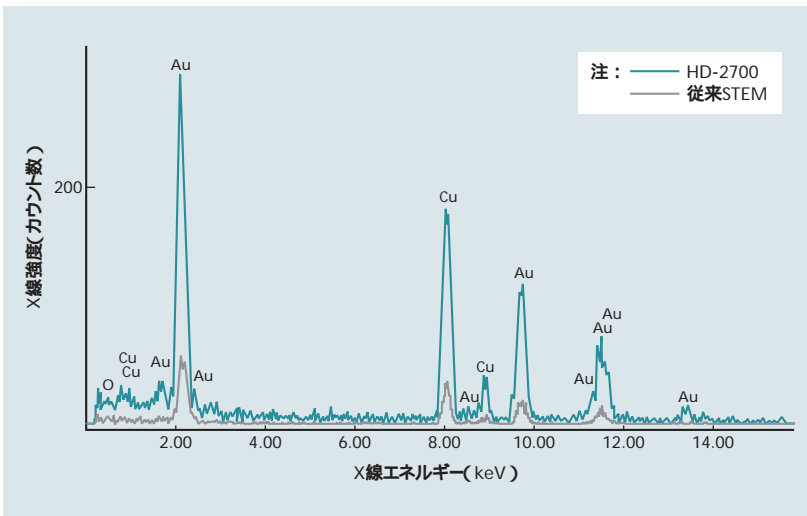


図8 Si半導体デバイス断面の暗視野STEM像およびEDX元素マッピング像
 元素分布像の取得時間は従来よりも10倍早く、高スループット、高感度なEDX分析が可能である。



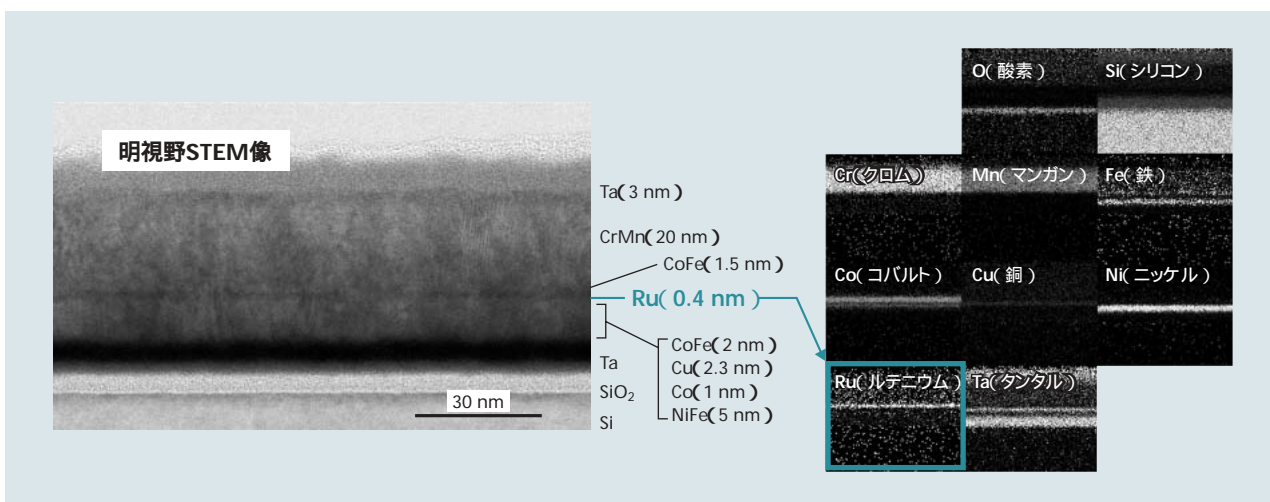
注:略語説明 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:エネルギー分散型X線分光法)

図6 EDXスペクトル

サンプルには銅メッシュ/カーボン支持膜上の金粒子を用い、プロブサイズは0.2 nm、取り込み時間は20秒である。

Si半導体デバイス断面の暗視野STEM像と、EDX元素マッピング像を図8に示す。半導体ドーパントのヒ素(As)の濃度が2 at. % 以下にもかかわらず、取り込み時間わずか5分でEDX元素マッピング像にAsの分布状態が可視化され始め、20分で十分な像強度が得られた。この元素分布像の取得時間は従来比で10倍早く、高スループット、高感度なEDX分析が可能であることを示している。

GMR(Giant Magneto-Resistance)ヘッド断面の明視野STEM像と、EDX元素マッピング像を図9に示す。EDX元素マッピング像でGMRの構成元素が明瞭に識別できるとともに、0.4 nm厚のルテニウム(Ru)



注:略語説明 GMR(Giant Magneto-Resistance)

図9 GMRヘッド断面の明視野STEM像およびEDX元素マッピング像
プローブサイズは0.2 nm,プローブ電流は150 pA,取り込み時間は15分である。

層が明瞭に観察され,高い空間分解能のEDX分析が可能となった。

5. おわりに

ここでは,球面収差補正器を搭載したSTEM「HD-2700」の開発コンセプトと,0.14 nmの高分解能,従来比で一けた大きなプローブ電流など,優れた基本性能,電子デバイス解析への適用結果について述べた。

HD-2700は,株式会社日立ハイテクノロジーズがSTEM専用機の技術ノウハウを駆使して開発したハイエンド機である。すでに2006年9月に札幌で行われた第16回国際顕微鏡学会議では実機を展示した。今後,半導体デバイスや材料,ナノテクノロジーの研究開発現場での活用が期待されている。

執筆者紹介



中村 邦康
1992年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ
ナノテクノロジー製品事業本部 那珂事業所 先端解析シ
ステム第二設計部 所属
現在,走査透過電子顕微鏡の設計・開発に従事
日本顕微鏡学会会員,応用物理学会会員



今野 充
1993年日立計測エンジニアリング株式会社入社,株式会
社日立ハイテクノロジーズ ナノテクノロジー製品事業本部
那珂事業所 那珂アプリケーションセンタ 所属
現在,TEM/STEM/FIB装置拡販のためのアプリケーション
開発に従事
日本顕微鏡学会会員



稲田 博実
1998年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ
ナノテクノロジー製品事業本部 那珂事業所 先端解析シ
ステム第二設計部 所属
現在,走査透過電子顕微鏡の設計・開発に従事
日本顕微鏡学会会員



小川 太郎
1984年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ
先端製品営業本部 営業技術部 所属
現在,TEM/STEM/FIB装置の市場開拓に従事
工学博士
日本顕微鏡学会会員,応用物理学会会員



田中 弘之
1993年日立製作所入社,株式会社日立ハイテクノロジーズ
ナノテクノロジー製品事業本部 那珂事業所 先端解析シ
ステム第二設計部 所属
現在,走査透過電子顕微鏡の設計・開発に従事
日本顕微鏡学会会員