

球面収差補正 TEM (200 kV) による半導体デバイス評価

日本電子株式会社 電子光学機器本部 奥西栄治、沢田 英敬
Electron Optics Division, JEOL Ltd.

透過電子顕微鏡に球面収差補正を施すことによって、顕微鏡像および元素分析の空間分解能は著しく向上する。元素分析の空間分解能はナノメートルのオーダーに達する。球面収差補正機構を搭載した加速電圧 200kV 透過電子顕微鏡を用いて、半導体デバイス評価を試み、これまで以上の微細な点について評価可能となった有効性を紹介する。

キーワード：球面収差補正、半導体デバイス、元素分析

Keywords: spherical-aberration corrector, semiconducting device, elemental analysis,

1. はじめに

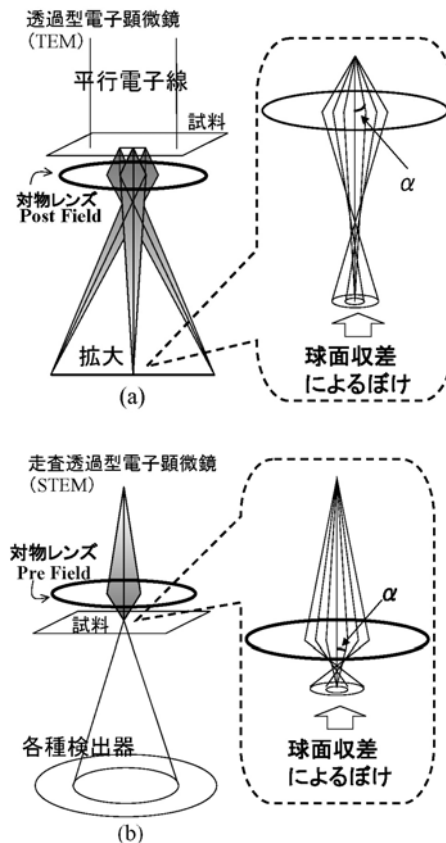
透過電子顕微鏡の高分解能化を妨げていた大きな要因は球面収差であったが、今世紀に入って球面収差補正機構が実機に搭載されるようになった。このような収差補正透過電子顕微鏡は EDS および EELS 分析技術とのマッチングにより、高分解能観察や高分解能分析に威力を発揮している。新開発された本装置は実際に工業製品の評価にも利用されるようになってきている。

透過型電子顕微鏡 (TEM) は一般的に、平行な電子線を試料に照射し磁場レンズで試料を透過した電子を拡大結像する (図 1(a))。一方、走査透過型電子顕微鏡 (STEM) では電子銃で形成されるプローブ像をレンズで縮小し、小さく絞った収束電子線を試料上で走査させ、試料を透過した散乱電子を検出し二次元像を構築する (図 1(b))。

TEM でも STEM でも多段レンズを用いて拡大或いは縮小するが、像分解能に最も大きな影響を与えるのは試料に近接する対物レンズの性能である。

高分解能 200 kV TEM/STEM としては、現在 0.2 nm 程の分解能が得られている。更に高分解能化を目指すためには、通常電子顕微鏡で用いられる円筒対称磁場レンズによる電子線の軸上収差 (光軸上の光源から出る電子線が受ける収差) を補正することが重要となる。なかでも球

面収差は、レンズの近軸を通る電子線が結ぶ焦点と、レンズの外側を通る電子線の焦点がずれることにより生じるものであり、その大きさは電子線の開き角 α (図 1 参照) と収差係数 C_s を用いて $C_s \alpha^3$ と表される¹⁾。



しかしながら、Scherzerの定理から円筒対称レンズでの球面収差係数は常に正であり、従来の円筒対称レンズのみを用いて球面収差を小さくすることには限界がある²⁾。実際、現在実用化されている加速電圧200 kVのTEM/STEMの高分解能対物レンズの球面収差係数Csは0.5 mmであり、これを如何に小さくするかが電子顕微鏡の磁場レンズの設計課題であった。この限界を超える手法として多極子レンズが提案され、それによる球面収差補正技術により従来にない高分解能化が実現されるようになってきた。Haider^{3) 4)}らは、6極子TEM球面収差補正器を200 kV電子顕微鏡に搭載し、実際に球面収差補正が行えたことを示した。細川、沢田、富田らは、Haiderらの補正器を搭載した200 kV FE-TEM⁵⁾及び

図1 TEM(a)およびSTEM(b)における球面収差によるぼけの略図。

STEM⁶⁾を開発した。本報告では、透過電子顕微鏡を半導体デバイス評価に利用した場合の球面収差補正の有用性について述べる。

2. 実験

試料にはある半導体デバイスを供した。評価装置は、球面収差(Cs)補正(CEOS GmbH)とEELS(GATAN ENFINA)を搭載したJEM-2100F(日本電子製)を用いた。半導体デバイスはイオンスライサ(日本電子)で薄膜試料とし、STEMモードで観察した。

3. 結果

図2はCs補正を施したHAADF像と通常のHAADF像に示した交点におけるEELSスペクトル比較である。電子ビームが絞れているためにスペクトル強度が全体的に高くN-Kのピーク強度は、Cs補正を施さない場合の45倍以上に達している。

図3は、図2と同一視野でのHAADF像とN-K、O-KのEELSによるマップについてCs補正を施した場合と施さない場合の比較である。右側に示すラインプロファイルからわかるように、Cs補正を施した場合は、スペクトル強度が桁違いに高くなっているだけでなく、Cs補正を施さなかった場合はこれらのピーク検出が不可能である。Cs機では境界層における酸素分布観察が可能となった。

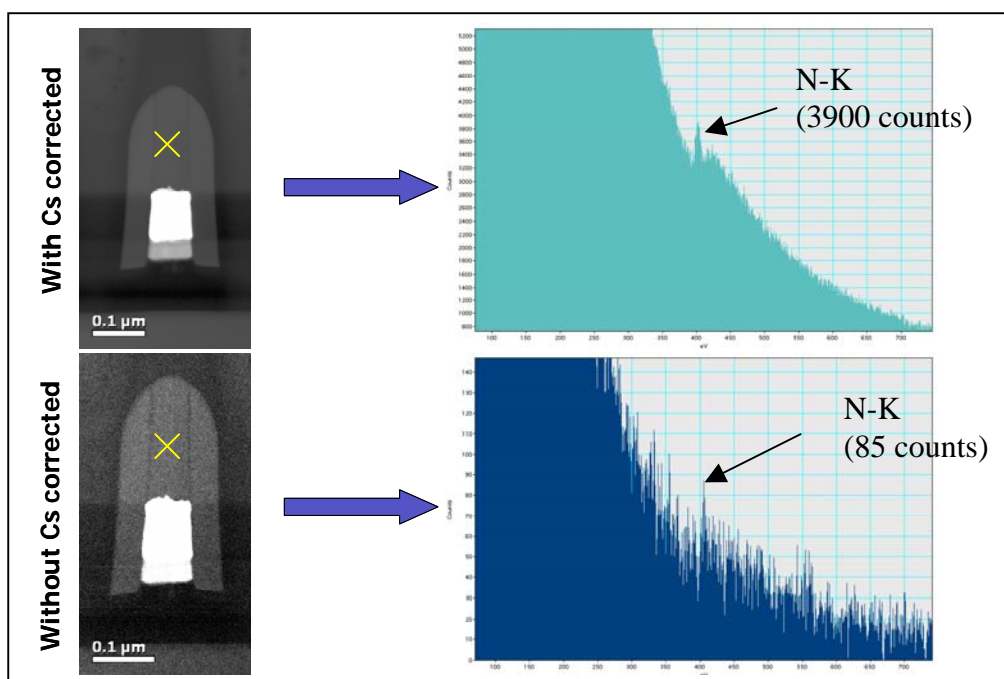


図2 HAADF像とEELSスペクトルのCs補正を施した場合と施さない場合の比較

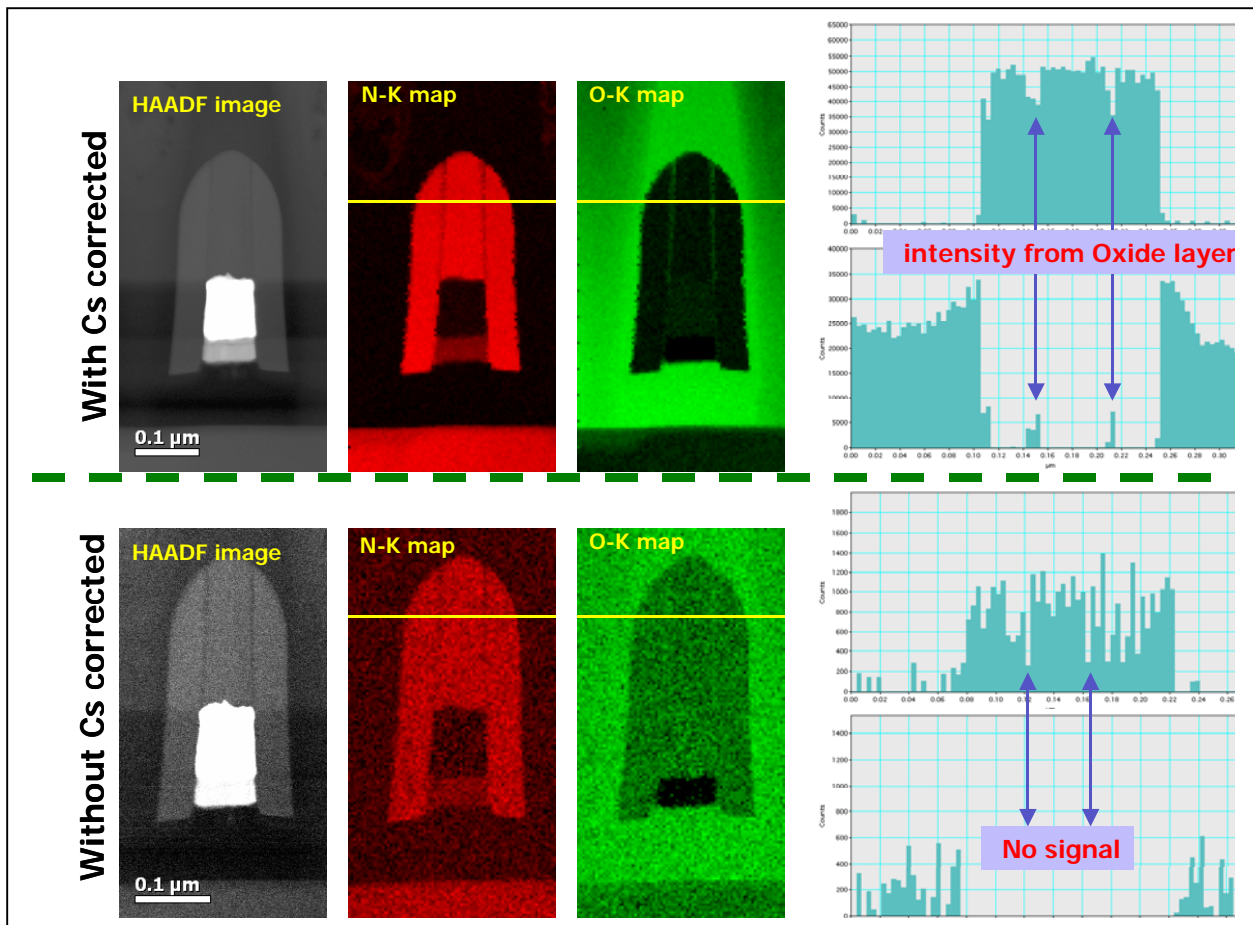


図3 HAADF像とEELSマップのCs補正を施した場合と施さない場合の比較

参考文献

- 1) M. Born and E Wolf, "Principles of Optics", Chapter V.
- 2) P. W. Hawkes and E. Kasper, "Principles of Electron optics Vol.1", Chapter 7 and Chapter 24.
- 3) M. Haider, G. Braunshausen and E. Schwan Optik, **99**, 167-179 (1995)
- 4) M. Haider, S. Uhlemann, E. Schwan, H. Rose, B. Kabius and K. Urban, Nature, **392**, 23 (1998)
- 5) F. Hosokawa, T. Tomita, M. Naruse, T. Honda, P. Hartel and M. Haider J. Electron. Microsc., **52**, 3-10 (2003)
- 6) H. Sawada, T. Tomita, M. Naruse, T. Honda, P. Hambridge, P. Hartel, M. Haider, C. J. D. Hetherington, R. C. Doole, A. I. Kirkland, J. L. Hutchison, J. M. Titchmarsh and D. J. H. Cockayne, J. Electron Microsc., **54**, 123-126 (2005)

LSI テスティング シンポジウム 会議録, pp.311-314, 2006 / ©LSI テスティング 学会