

Cold FE電子銃を搭載した ハイエンド分析電子顕微鏡「HF-3300」

High-end Analytical Electron Microscope HF-3300 Equipped with Cold FE Electron Gun

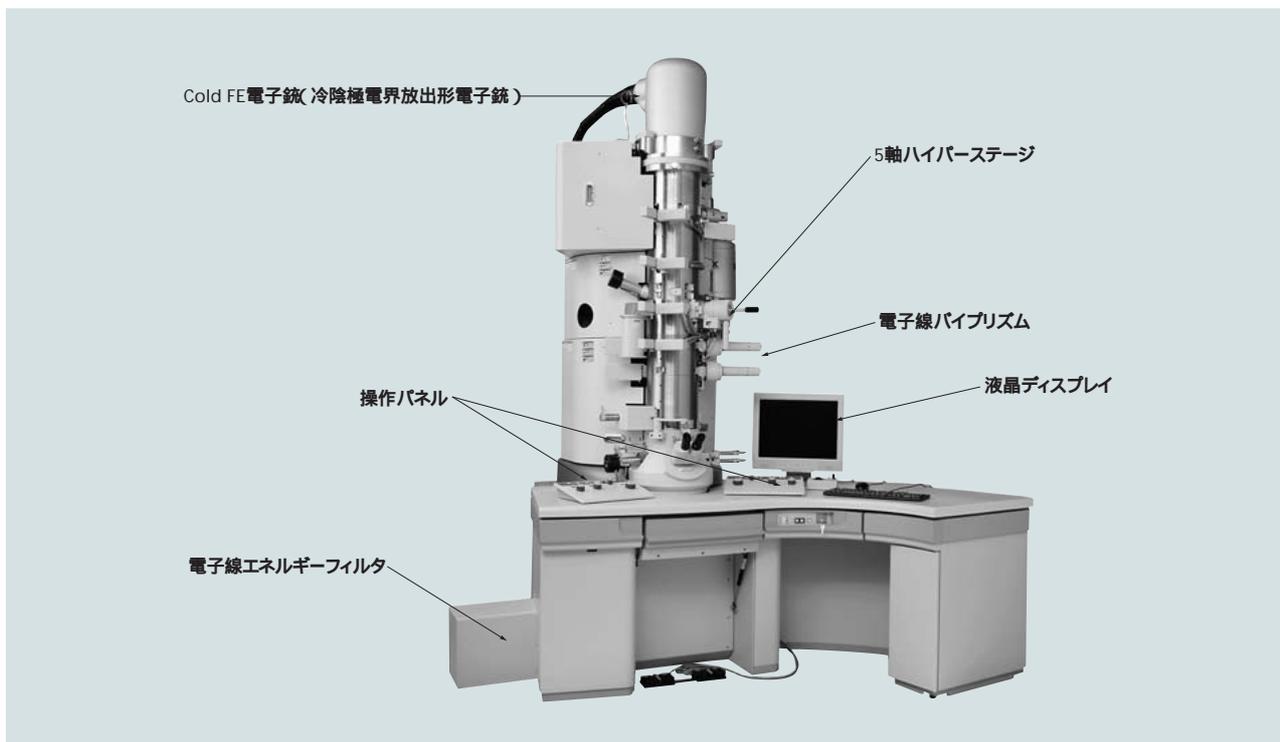
佐藤 岳志 Takeshi Sato

今野 充 Mitsuru Konno

馬見新 秀一 Shuichi Mamishin

松本 弘昭 Hiroaki Matsumoto

谷口 佳史 Yoshifumi Taniguchi



注:略語説明 Cold FE(Cold Field Emission)

図1 電界放出形透過電子顕微鏡「HF-3300」の外観

Cold FE電子銃と加速電圧300 kVを組み合わせた新型の電界放出形透過電子顕微鏡「HF-3300」の外観を示す。

株式会社日立ハイテクノロジーズは、ハイエンドな透過電子顕微鏡(TEM)として、高輝度と高エネルギー分解能が同時に得られるCold FE電子銃(冷陰極電界放出形電子銃)を搭載した電界放出形透過電子顕微鏡「HF-3300」を開発した。Cold FE電子銃の有する特長が新たな解析評価技術を生み、これまで電子顕微鏡では見ることができなかったものが見られるようになってきた。その結果、半導体デバイス開発や不良解析、プロセス反応の解明に至るまで、高度化する解析ニーズへの対応が可能となった。電子顕微鏡技術を用いた解析評価や材料開発分野において新境地を切りひらく、次世代の電子顕微鏡として期待される。

1.はじめに

TEM(Transmission Electron Microscope:透過電子顕微鏡)は、半導体デバイスの開発や品質管理において欠くことのできない解析ツールとなっている。しかし、近年のデバイスシュリンクや構造の立体化、多層化により、不良解析やプロセス反応の解明においては、従来の電子顕微鏡では十分に対応できない場合もあり、特に、微少な濃度分布状態や、積層膜の深さ方向の分析を、高分解能でかつ高精度に計測することは、ニーズの高まりに相反して困難な状況になっている。

このようなニーズに対応するため、株式会社日立ハイテクノロジーズは、Cold FE(Cold Field Emission)電子銃(冷陰極電界放出形電子銃)を搭載した最高加速電圧300 kVの「HF-3300」形TEMを開発した(図1参照)。

ここでは、Cold FE電子銃の特長と「HF-3300」を用いた半導体デバイスの解析手法、およびその応用例について述べる。

2. Cold FE電子銃の特長

Cold FE電子銃は、鋭い尖(とが)ったチップから高電界により電子を外部に引き出し、プローブを形成する。電界放出における見かけ上の光源(電子源)の大きさは数ナノメートルと小さく、高い輝度を得ることができる。また、チップから電子を引き出す際、フィラメントを加熱する必要がないため、電子エネルギーの熱揺らぎが少なく、高い干渉性の電子線を得ることができる(表1参照)。通常使用時(表1中の灰色枠内部分)のCold FE電子銃の輝度は、SE(Schottky Emission:ショットキー電子銃)の約3倍であり、エネルギー幅はSEの半分以下となる。このため、Cold FE電子銃は、高干渉性の電子線を必要とする電子線ホログラフィー法やEELS(Electron Energy-loss Spectrometer:電子エネルギー損失分光)法による局所化学結合状態の解析に最適である。

3. 電子線ホログラフィー法

3.1 電子線ホログラフィーの原理

電子線ホログラフィー法は、試料の電場や磁場を電子線の位相変化としてとらえ、それらの分布を可視化する手法である¹⁾。通常のTEMは、試料や空間を通過した電子線の強度のみをとらえるのに対し、電子線ホログラフィーでは、電子線の位相変化をホログラム(干渉パターン)として記録する。

ホログラム撮影の概要を図2に示す。ホログラムは、試料あるいは観察領域を通過した電子波(物体波)と、真空領域を通過した電子波(参照波)を干渉させることによって得られる。この二つの電子波を干渉させるために用いるのが電子線パイプリズムである。パイプリズムは、1対の接地電極と導電性ワイヤとから成り、通常、ワイヤに正の電圧を印加することにより、両側の電子線を引き寄せるように曲げ、像面上で干渉させる。

ホログラムから像への再生はコンピュータを用いることで、位相変化を白黒の濃淡で表す位相分布像や、等位相の部分を線でつなぐ干渉顕微鏡像として再生される。

表1 冷陰極電界放出形電子銃とショットキー電子銃の性能比較
灰色の枠内の値が通常使用値となる。

エミッタ	FE W(310)			SE Zr/O/W(100)		
仕事関数 (eV)	4.5			2.8		
動作温度 T(K)	300			1,700		
全放出電流 I _e (μ A)	10	30	100	30	100	300
輝度 A/cm ² /sr	2.9 $\times 10^8$	8.7 $\times 10^8$	2.9 $\times 10^9$	8.8 $\times 10^7$	2.9 $\times 10^8$	8.8 $\times 10^8$
エネルギー幅 E(eV)	0.45	0.55	0.7	1.0	1.3	1.8

注:略語説明 FE(Field Emission), SE(Schottky Emission)

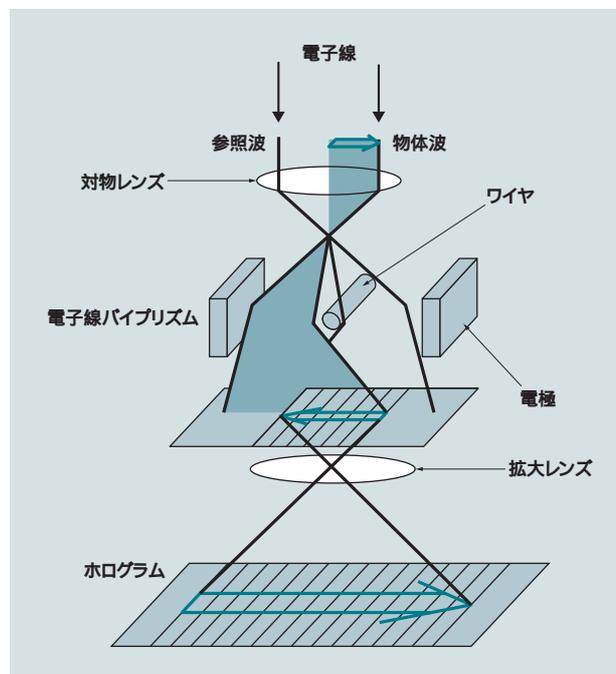


図2 ホログラム撮影の概要

物体波と参照波をパイプリズムにより干渉させてホログラムを得る。ホログラムはフィルムやCCD(電荷結合素子)に記録する。

3.2 半導体デバイスのドーパント分布の可視化例

半導体内のpn(Positive-Negative)接合における空乏層の空間電荷は、内部電場を発生させる。この電場はドーパント(不純物)の分布によって決まる。ドーパント分布は、半導体デバイスの性能を直接的に左右するため、内部電位を可視化できる電子線ホログラフィー法のデバイス開発分野における応用展開に期待が高まっている²⁾。

電子線ホログラフィー法を用いて、半導体デバイスの電位分布を可視化した例を図3に示す。図3(a)が位相分布像、図3(b)がEDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometer:エネルギー分散型X線装置)によるヒ素の元素分布、図3(c)が(a)内に示したA-B領域の位相プロファイルである。位相像においてゲート電極の下部両側のSi基板領域に、内部ポテンシャルの差によって生じる電位分布が白黒の濃淡として明瞭に確認されている。また、電子線ホログラフィー法は、ドーパントの種類に依存しないため、特性X線では検出が困難な軽元素(例えばボロン)のドーパント濃度分布を高感度に観察することも可能である。

4. 位置分解型EELS法

4.1 位置分解型EELS法の特長

分析電子顕微鏡の普及により、EELS法による化学的結合状態分析への期待が高まっている。EELS法にて結合状態の変化を計測するためには、ピーク位置や波形を高精度に評価する必要がある。HF-3300では、各測定点での一次電子線エネルギーのゼロ点変動による定量精度への影響を回避し、

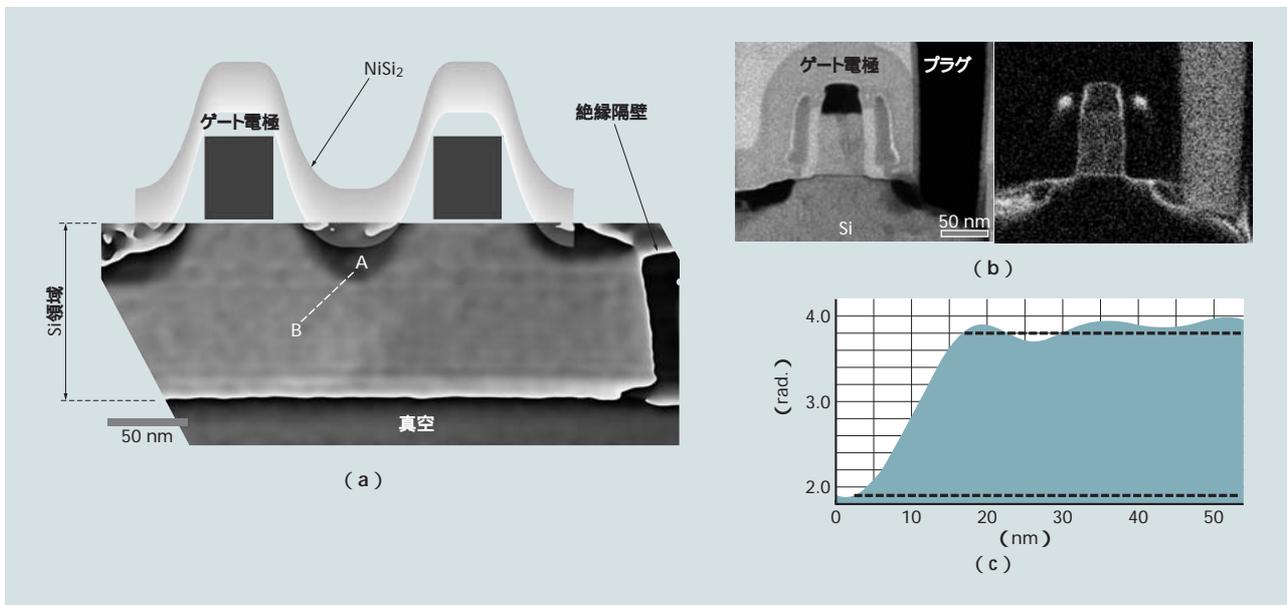


図3 電子線ホログラフィーによる半導体デバイスの可視化例

位相分布像(a)に、EDX(エネルギー分散型X線装置)によるヒ素の元素分布像(b)に、(a)中のA、Bから抽出した位相プロファイル像(c)にそれぞれ示す。(a)において色の濃い部分がn型、淡い部分がp型を示している。(b)にはゲート電極の両側にnMOS(Negative Channel Metal Oxide Semiconductor)のドーパントであるヒ素が確認できる。(c)の断面プロファイルから位相差を抽出し、ピロトインポテンシャルを求めることが可能となる。

多点同時分析を可能とする位置分解型EELS法を採用した^{3,4)}。

HF-3300の基本的な構成および位置分解型EELS法の概念を図4に示す。この手法は、電子線エネルギーフィルタをラインフォーカス条件にし、試料上の異なる位置のスペクトルを検出器上の異なる位置に投影することにより、同時に複数点のスペクトルを計測する。したがって、得られるスペクトルの縦軸は試料位置に対応し、横軸はエネルギーロス値となる。Cold FE電子銃との組み合わせにより、0.5 eV以下のエネルギーシフトを計測することが可能となる。

4.2 位置分解型EELS法の積層膜への応用事例

試料はシリコン酸化膜とシリコン窒化膜の積層膜(ONO膜)

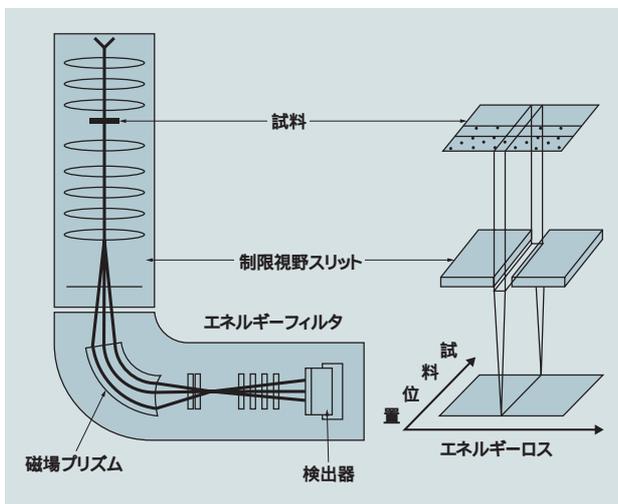


図4 HF-3300の基本的な装置構成

位置分解型EELS(電子エネルギー損失分光)法によって得られる位置分解型EELS像は、縦軸が試料の位置情報を反映し、横軸はエネルギーロス eV となる。

を用いた(図5参照)。ONO膜は不揮発性メモリなどに用いられ、これらの絶縁膜の特性(素性)がデバイス動作の信頼性に影響を与えられている。

シリコンの位置分解型EELSの測定結果、および各層から抽出した電子エネルギー損失スペクトルを図6に示す。各層からのスペクトルを解析することにより、原子の結合状態や組成情報を引き出すことができる。例えば、SiO_xN_yの組成を定量化するために、抽出したスペクトルの形状を幾つかのリファレンスEELSスペクトル(Si, SiO₂, SiONなど)を用いて、多変量解析することにより再現し、SiとOあるいはNの比が求められる⁵⁾。

この手法は、図6中のスペクトル(e)のように、約1 nm膜構造からのピーク高精度に計測でき、高い空間分解能で積層膜界面の評価が可能であることがわかる。

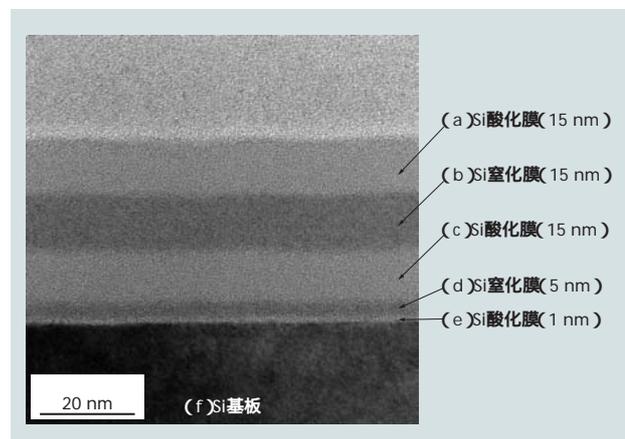


図5 ONO膜のTEM像

Si基板上に積層されたSi酸化膜層およびSi窒化膜層が確認できる。

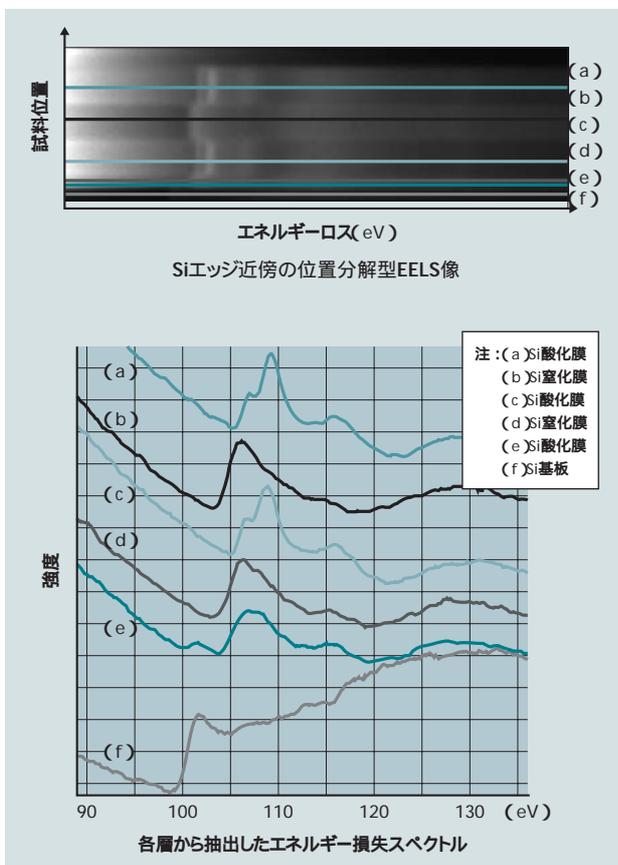


図6 Siの位置分解型EELS像と各層から抽出したスペクトル
位置分解型EELS像は、基本倍率2万倍、露光時間30秒で取得する。位置分解型EELS像からのスペクトルは、10ピクセルのライン幅で抽出する。なお、10ピクセルは1 nmに対応する。

執筆者紹介



佐藤 岳志
2005年株式会社日立ハイテクノロジーズ入社、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ー 所属
現在、TEM装置販売促進のためのアプリケーション開発に従事
理学博士
日本顕微鏡学会会員



松本 弘昭
1994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ー 所属
現在、TEM/STEM/FIB装置販売促進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



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ー 所属
現在、TEM/STEM/FIB装置販売促進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

5. おわりに

ここでは、「HF-3300」における最新アプリケーションデータを中心に述べた。

HF-3300は、Cold FE電子銃を装備し、高輝度で、かつ高エネルギー分解能を有するハイエンドなTEMである。この特長を生かした電子線ホログラフィー法や位置分解型EELS法を用いて、極微量な濃度分析や、ナノ領域における化学結合状態の解析が可能である。

HF-3300は、半導体デバイスの微細構造や不良原因などを多角的な視点から解明する強力なツールとして大いに期待される。

参考文献

- 1) A. Tonomura: Electron Holography, Springer Series in Optical Sciences 70 (Springer Verlag, Heidelberg, 1993)
- 2) 平山: 電子線ホログラフィーによる結晶内部電位の測定, 日本結晶学会誌, 47, 95 (2005)
- 3) K. Kimoto, et al.: Chemical Shift Mapping of Si L and K Edges Using Spatially Resolved EELS and Energy-Filtering TEM, Journal of Electron Microscopy 46, 369 (1997)
- 4) T. Sekiguchi, et al.: Nitrogen Distribution and Chemical Bonding State Analysis in Oxynitride Film by Spatially Resolved Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS), Japanese Journal of Applied Physics 37, L694 (1998)
- 5) F. Yano, et al.: Quantitative analysis of silicon oxynitride by using energy loss spectrum for Si-L edge 8th APEM, 84 (2004)