

エネルギー選択による信号検出 (ExB)

Introduce of the Signal Detection System Using ExB

多持 隆一郎, 渡邊 俊哉

Ryuichiro Tamochi and Shunya Watanabe

^a株式会社日立ハイテクノロジーズ

要旨 走査電子顕微鏡 (以下 SEM) の像コントラストは、二次電子の発生効率と二次電子検出器の位置により決定される。しかし、一般的な二次電子検出器は、二次電子信号だけではなく、反射電子により励起された二次電子も検出しており、高加速電圧観察では試料最表面の観察を行うことが困難であった。一方、低加速電圧領域の高分解能化は、電界放射型電子銃と強励磁型対物レンズの採用で実現された。また、強励磁型対物レンズを搭載した SEM では、二次電子信号と反射電子信号を同一の検出器で制御しながら観察できる機能も搭載されている。今回は、二次電子/反射電子信号の制御機能を有するシュノーケル型対物レンズ (以下、セミインレンズ) を搭載した検出器の手法である ExB を紹介する。

キーワード : インレンズ型対物レンズ, シュノーケル型対物レンズ, TTL, ExB

1. はじめに

近年、走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, 以下 SEM) を用いた半導体デバイスや各種ナノ材料の観察では、単に試料表面構造の観察ではなく、複合材料の分散状態、多層薄膜の膜厚や均一性の評価ニーズが高まってきた。これらニーズを実現するには、組成情報を持つ反射電子信号を高い空間分解能で検出する必要がある。

一方、SEM の分解能は、電界放射型電子銃 (FE 銃) や強励磁型対物レンズの採用により低収差の観察が実現し飛躍的に向上した。さらに、最近の強励磁型対物レンズを搭載した電界放射型 SEM (FE-SEM) は、試料から発生した二次電子/反射電子の信号を制御して検出する機能が搭載されている。特に、反射電子像は、反射電子信号を二次電子信号に変換して形成されていることから、低エネルギー領域の反射電子信号の検出も可能となった。これにより、これまで反射電子像では観察が困難であった多層薄膜の構造への応用も可能となった。今回は、二次電子/反射電子信号の制御機能を有する強励磁型対物レンズを搭載した SEM の信号制御法について紹介する。また、表 1 に二次電子信号と反射電子信号の特長を示す。

2. 最新 FE-SEM の特長

FE-SEM に用いられている二次電子検出器 (SE 検出器) は、基本的に Everhart らが 1960 年に開発したもの¹⁾と同じであるが、電子光学系の進歩に対応して、二次電子検出器の配置や電界と磁界の組み合わせなど、機能的には大きな進歩が見られる。ここでは、超高分解能 FE-SEM に採用された強励磁型対物レンズと二次電子検出法について紹介する。

2.1 強励磁型対物レンズ

強励磁対物レンズは、試料を対物レンズの上下磁極間に挿入して観察するインレンズ型対物レンズが一般的である (図 2 (a) 参照)。インレンズ型を搭載した最新の SEM では、低加速電圧 1 kV において 1.6 nm、高加速電圧 30 kV において 0.4 nm の高分解能を実現した。しかしながら、インレンズ型では、試料サイズの制限があり大口径の試料を非破壊で観察することが不可能である。そこで、大口径の試料を高分解能で観察可能とするため、シュノーケル型対物レンズ (図 2 (b) 参照) を搭載した SEM が開発された。シュノーケル型対物レンズでは、磁場がレンズの下面に漏れ出し仮想

表 1 二次電子信号と反射電子信号の特徴

信号	特長
二次電子	<ul style="list-style-type: none"> ・最表面情報に敏感 ・空間分解能が高い ・電位コントラストに敏感
反射電子	<ul style="list-style-type: none"> ・組成情報に敏感 ・帯電現象の影響が少ない ・エッジコントラストが小さい

^a 〒312-0057 ひたちなか市石川町 11-1
TEL: 029-354-1970; FAX: 029-354-1971
E-mail: tamochi-ryuichiro@naka.hitachi-hitech.com
2008 年 5 月 15 日受付

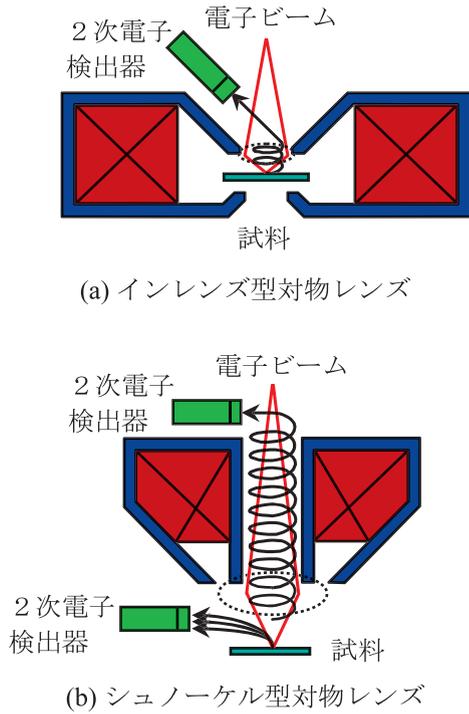


図1 強励磁型対物レンズ. (a) インレンズ型対物レンズ
(b) シュノーケル型対物レンズ.

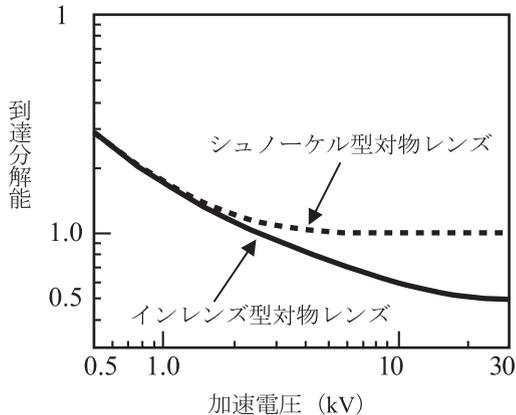


図2 強励磁型対物レンズの到達分解能

レンズを形成し、短焦点化を実現した。これにより、特に低加速領域では、インレンズ型 SEM と同等の分解能を得ることが可能となった (図2 参照)。

2.2 強励磁型対物レンズに採用された検出方式

図1に示した強励磁型対物レンズでは、試料から発生した二次電子がレンズ磁界に拘束され対物レンズの上部に進行することから、二次電子検出器は対物レンズの上部に配置する必要がある。この方式は TTL (Through The Lens) 方式と呼ばれ、強励磁型対物レンズには一般的に採用されている。一方、二次電子検出器は試料から発生した二次電子を効率良く捕集し加速する目的でグリッドに約 200 V、またシンチレータに 10 kV の電圧 (後段加速電圧) が印加されている²⁾。

しかし、対物レンズの上部に設置した二次電子検出器は、一次電子の光軸に近いことから二次電子検出器から発生する電界の影響 (一次電子の軌道が乱される現象) を受けることが懸念されていた。この問題を解決するために、ExB (E クロス B) と呼ばれる機能が採用されている³⁾。ExB は互いに直交する電界と磁界を意味している。図3にその原理を示す。ExB では、二次電子検出器の不均一な電界をメッシュ電極でシールドするとともに、メッシュ電極と対向電極とで均一電界 E を光軸上に発生させる。そして、この電界 E と直交する向きに磁界 B を発生させると、一次電子と二次電子に対して非常に都合のよい作用が生まれる。まず、一次電子に対しては、電界と磁界の作用が互いに打ち消すようにできる。この結果、一次電子は何の影響も受けずに ExB 領域を通過するため、軸ずれが発生しない。一方、二次電子は一次電子と逆向きに進行するため、フレミングの法則によって磁界の作用が一次電子と逆向きになる。その結果、二次電子に対しては電界と磁界が同じ向きに作用し、二次電子検出器の方向に軌道が強く偏向されて高効率な二次電子検出が可能になる。ExB 方式を用いた最初の TTL 方式は、シュノーケル形 FE-SEM として製品化された。

2.3 TTL 方式に採用された信号制御システム

電子ビームを試料に照射すると、様々な情報媒体が放出され、SEM ではそれらを実験目的に応じて選択して像形成を行っている。これまで、二次電子情報と反射電子情報を検出する場合、異なる検出器を用い観察条件なども変更して像形成を行っていた。しかし、微小なエリアを迅速に解析する場合には、観察しながら最適な情報を検出することが必要不可欠である。2.1, 2.2 項で述べたように TTL 方式と ExB を採用することで、二次電子信号の高効率検出が実現され、低加速電圧領域の高分解能観察が可能となった。ここでは、低エネルギー反射電子信号の検出法について紹介する。

反射電子は、図4に示すように、試料からの放出角度 (θ) によって異なる情報をもたらす。したがって、高分解能な TTL 方式において、二次電子と放出角度 θ の異なる反射電子の検出量を自由に制御できれば、高分解能と高コントラストが両立できる。そこで、図5に示す信号検出装置が製品

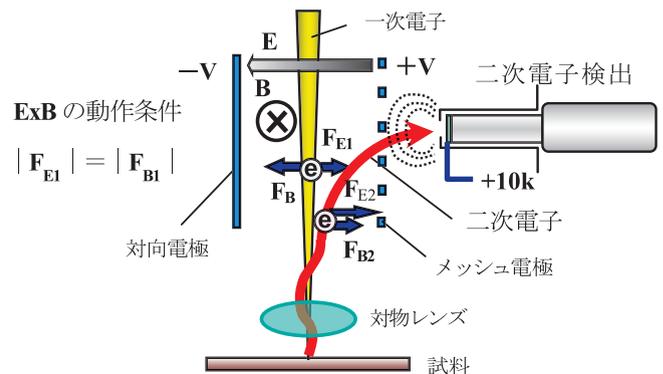


図3 ExB (直交電磁界) による二次電子軌道の分離

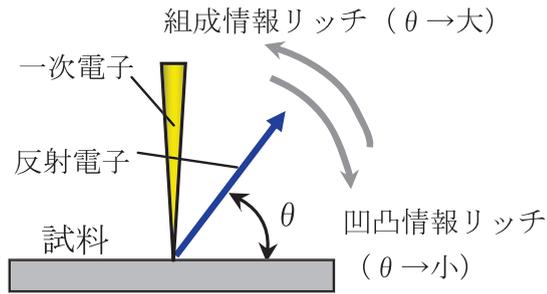


図4 反射電子の放出角度 θ と試料情報

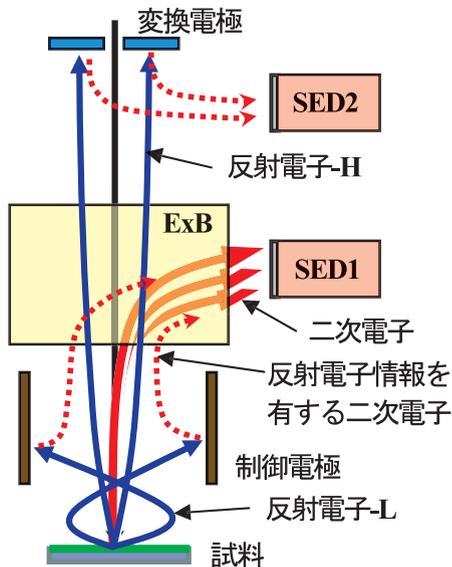


図5 S-5500形の信号検出装置の構成

化された⁴⁾。この信号検出装置では、浅い角度の反射電子-Lが制御電極に衝突して二次電子を発生する。この二次電子は、反射電子-Lの情報を持っており制御電極の印加電圧で、その検出量が制御される。制御電極に正の電圧を印加すると、試料から発生した二次電子は二次電子検出器 (SED1) に検出されるが、制御電極から発生した二次電子 (反射電子-Lの情報) は、制御電極にトラップされて検出されない。しかし、制御電極に負の電圧を印加すると、制御電極から発生した二次電子が検出され、試料から発生した二次電子は、制御電極の電圧でその検出量を制御できる。一方、放出角度の大きい反射電子-Hは、変換電極に衝突して二次電子 (反射電子-Hの情報) を発生し、これが二次電子検出器 (SED2) に検出される。SED1とSED2の信号量は電氣的に合成され、画像信号として任意の比率で加算できる。

3. 応用例

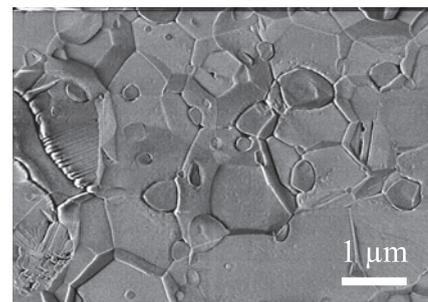
3.1 セラミックスの観察例

図6は、複合セラミックスを加速電圧1.5kVの二次電子像と反射電子像を観察した例である。二次電子像では、低加速電圧観察特有の試料最表面の構造が観察されている。また、

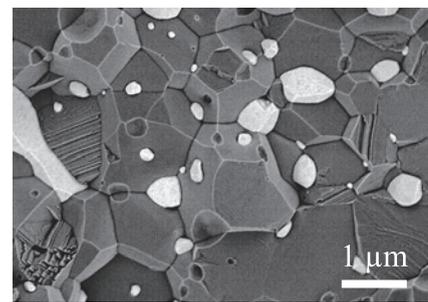
今回の検出手法を用いると、これまで観察が困難であった低加速電圧での反射電子像が明瞭に観察され、セラミックスの中に存在するニッケル (Ni) の分散状況を把握することができる。この信号検出装置では、浅い角度の反射電子-Lが制御電極に衝突して二次電子を発生する。この二次電子は、反射電子-Lの情報を有している。

3.2 半導体デバイスの観察

図7に半導体デバイスのSRAM (Static Random Access Memory) ゲート部を観察した例を示す。本試料は無蒸着で観察しているが、シグナル可変モードを用い、チャージアップ現象を受けないように、反射電子信号を検出することで、明瞭なコントラストを得ることができた。また、最近の半導体デバイスは、高密度、高速化を実現するために多層構造化



(a) 二次電子像



(b) 反射電子像

図6 シュノーケル形 FESEM (S-4800 形) で測定した各種信号の SEM 像 (複合セラミックス)。(a) 二次電子像 (b) 反射電子像。試料提供：東北大学多元物質科学研究所 関野 徹先生

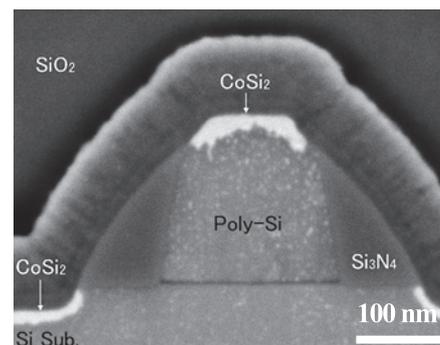


図7 インレンズ形 FESEM で測定した半導体デバイスの内部構造

しており、反射電子信号を検出することで組成コントラストが得られ、SRAM ゲート部のスペーサ (Si_3N_4) の形状や Poly-Si ゲートの電極形状およびゲート長が、さらに膜厚 20 nm 程度の CoSi_2 層が高いコントラストで明瞭に観察されている。

4. おわりに

最近の SEM は、高分解能観察に加え信号制御機能を有することで、同一視野の二次電子、反射電子の情報を低加速電圧領域で容易に観察することが可能となった。これにより、バルク試料の最表面の形状、組成が可視化され、材料の研究開発や評価に利用されることが期待される。

- 1) Everhart, T.E. and Thornley, R.F.M.: *J. Sci. Instrum.*, **37**, 246 (1960)
- 2) 田辺良美：走査電子顕微鏡の基礎と応用，共立出版，東京，1983，p. 18
- 3) Sato, M., Todokoro, H. and Kageyama, K.: *Proc. SPIE* 2014, **17** (1993)
- 4) Sato, M., Kageyama, K. and Nakagawa, M.: *Recent Res. Devel. Vacuum Sci. & Tech.*, **3**, 263 (2001)