ナノテクノロジーをサポートする SIM 像の応用

鈴木俊明*, 遠藤徳明*, 柴田昌照*, 釜崎清治**, 市ノ川竹男***

*日本電子(株) (〒196-8558 東京都昭島市武蔵野 3-1-2)
**東京都立大学大学院 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
***早稲田大学 理工学部 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

SIM with FIB to Support Nano-Technology

Toshiaki SUZUKI*, Noriaki ENDO*, Masateru SHIBATA*,
Seiji KAMASAKI** and Takeo ICHINOKAWA***

*JEOL Ltd. (3-1-2, Musashino, Akishima-shi, Tokyo 196-8558)
**Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University (1-1, Minami-Ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397)
***Department of Applied Physics, Waseda University (3-4-1, Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555)

Key Words: FIB(Focused Ion Beam System), SIM(Scanning Ion Microscope Channelling)

1. はじめに

半導体デバイスの不良解析や回路修正に幅広く活用されている FIB(Focused Ion Beam System, 集束イオンビーム装置: 図 1) は、液体金属イオン源(LMIS)²⁾より引き出され、静電レンズ系により細く絞られた、Ga⁺ イオンビームを試料表面に照射する。このイオンビームを X, Y 方向に走査することにより、試料表面から発生する 2 次電子による画像、すなわち SIM(Scanning Ion Microscope, 走査イオン顕微鏡) 像が得られる。これにより観察目的となる場所をピンポイントに特定し、ナノオーダーの精度で断面加工することができる。また、有機金属ガスを導入しながら、イオンビームを走査することにより、金属膜をデポジションする機能も併せ持つ。これらの特性を活用し、SEM(走査型電子顕微鏡)、

TEM(透過型電子顕微鏡)、AES(オーグメント電子分光)、EPMA(X 線マイクロアナライザー)などの試料作製にも幅広く活用されるようになった。SIM 像に関しては、前述の通り、加工部位の位置決めを行うための重要な機能として利用されているが、その詳しい性質はあまり知られていない。しかし、興味深い現象が多く見られる。本解説では SIM 像の性質を理解することにより FIB が観察装置としても有効であることを確認し、幅広い分野で FIB が活用できることを示したい。

2. SIM 像の性質

SIM 像で得られた情報は SEM 像との共通点が多いが、SEM 像では得られにくい情報も多く含まれる。色々な試料を用い、同一場所の SEM 像と SIM 像の比較を行った結果、

図 1 FIB の外観
最新の FIB(JEM-9310 FIB)の外観と断面構造を示す。FIB は液体金属イオン源(LMIS)、静電レンズ系などで構成されている。

図2 2次電子の発生深さの比較

ICパターン上に置かれた超薄切片を用い光学顕微鏡(a), SEM像(b), SIM像(c)の比較を行った(SEMおよびSIMの加速電圧は30kV)。

次のようなSIM像の興味深い特性が明らかになった。

- (1) 試料最表面の情報が得られる。
- (2) チャンネリングコントラストがSEMと比較して顕著である。
- (3) SIM像のコントラストの原子番号依存性はSEM像とほぼ逆転している。

以後、具体的にそれぞれの現象を解説する。

3. 試料最表面の情報

SEMの2次電子像は有機物、生体、高分子などの軽元素で構成されている試料の場合、最表面の構造が見難いことが多い。また、半導体デバイスの表面を高い加速電圧(加速電圧:30kV程度)でSEM観察すると、保護膜を透して配線構造が観察できるが、SIM像(加速電圧:30kV程度)では保護膜の表面しか見ることができないことも知られている。次のような比較実験から、SIM像の情報は試料最表面から発生していることが定性的に確認できる。ICパターン上に置かれた超薄切片(樹脂胞埋されたラットの腎臓をウルトラミクロトームにより、厚さ70nm程度に薄切したフィルム状試料)の同じ場所を光学顕微鏡、SEMおよびSIM像(SEM, SIM像ともに加速電圧30kV)で比較観察した。図2のように光学顕微鏡像とSEM像では超薄切片を透してICパターンが見られる。一方、SIM像ではICパターンが透けて見えることはなく、超薄切片の表面構造が見られる。また、SIM像で超薄切片の表面を拡大観察すると、図3のように生物組織の詳細な構造をとらえることができる。この結果より、SIM像はSEMと比較して(加速電圧が同じであれば)、試料のより最表面からの情報が得られていることがわかる。このことから、SIM像は最表面の観察に適していることがわかる。ただし、SIM像はGa⁺イオンビームにより、スパッタリングしながら観察する。このため長時間にわたり同じ場所を観察すると、変形などのダメージを生ずるため注意が必要である。

図3 SIM像(30kV)による超薄切片の拡大像

超薄切片表面の組織の詳細な構造を見ることができる。

図4 結晶コントラストの比較

Cu基板上に電解Niめっき/Auめっきを行った試料(上段)と、Cu基板上に無電解NiPめっき/Auめっきを行った試料(下段)で、SIM像(左列)およびSEM像(右列)の比較を、いずれも加速電圧30kVで行った。

4. 結晶コントラスト

半導体デバイス断面のアルミ配線などの結晶組織がSIM像ではよく見え、SEM像ではよく見えないという現象も経験的によく知られている。この結晶組織のコントラストは結晶方位の違いに起因しているため、チャンネルコントラストと呼ばれる現象である。この現象はSEM像でも見ることができるが、一定の条件(最表面が清浄であること、結晶に歪がないことなど)が整うことが必要である。これらを満足させるために電解研磨などの表面処理が必要になる場合が多い。次の実験より、SIM像は結晶組織の評価に有効であることがわかる。2つの試料、試料1(銅板上に電解Niめっき、さらに金めっきを行った積層試料)、試料2(銅板上に無電解NiPめっき、さらに金めっきを行った積層試料)を準備し、FIBによる断面加工を行いSIM, SEM像の比較観察を行った。図4に示すとおり、SIM像ではそれぞれの層

図5 SIM 像の結晶コントラストの変化(試料: Cu 基板上に電気 Ni めっき, さらに金めっきをした積層試料)

SIM 像の結晶コントラストは試料傾斜角度を変化(縦列)させると連続的に変化するのに対し, 加速電圧を変化(横列)させてもコントラスト変化は起こらない。

図6 SEM 像の試料傾斜角度の違いによる結晶コントラストの変化(試料: アルミニウムの板)

SEM 像では加速電圧を変化させることにより, 結晶コントラストは変化する。

の結晶組織が明確に観察され, 電解 Ni めっき層が柱状に成長した多結晶であるのに対し, 無電解 NiP めっき層はアモルファス, あるいは微結晶であることが明確に判断できる。一方, SEM 像では, 層構造は判断できるが, 結晶組織を観察することができないことがわかった。

さらにイオンビームの条件(入射角度, 加速電圧)を段階的に変化させるとにより, 興味深い結果を得ることができた。イオンビームの入射角度を段階的に変化させると結晶粒のコントラストは変化するが(図5縦列), 加速電圧を変化させても結晶コントラストは変化しない(図5横列)。一方, SEM 像では電子ビームの入射角の変化にともなう結晶コントラストの変化のほか, 図6に見られるように, 加速電圧を変化させても, 結晶コントラストの変化が見られる。これは, イオンと電子のチャンネルリングは異なる原因であることを示している。イオンの場合は, 結晶ポテンシャルの中を走行すると

深く浸入できる³⁾のに対し, 電子の場合は回折条件によって浸入深さに違いが起こり, 結果として2次電子強度あるいは反射電子強度に違いが生じる。これは電子回折の動力学的理論を用いて解釈できる。すなわち, SEM 像で見られるチャンネルリング現象は電子回折が関与しているため, 加速電圧変化にともなう電子線の波長の違いにより, 回折条件が異なりコントラストが変化するが, SIM 像で見られるチャンネルリング現象では回折は関与していないためである。

5. コントラストの逆転

半導体素子のような異種元素で構成された積層膜を SIM 像で観察すると, 各部の構成元素により明るさの違いが見られる。これは2次電子の発生効率が原子番号に依存していることを示している。次の実験により, SEM および SIM 像の原子番号とコントラストの関係を明らかにした。Si(100)基板上に Al, Cu, Ag, Au を蒸着したプレートを作製し, SIM 像および SEM 像で観察し, 原子番号によるコントラストの違いを実験的に調べた。その結果, 図7で示すように SIM と SEM では逆のコントラストを与えることがわかった。すなわちイオンと電子では2次電子発生効率の原子番号依存性が逆という結果が得られた^{4),5)}。

次に相変化型記録メディアである CD-RW⁶⁾の表面を比較した結果, 図8のように, 信号が入力され, アモルファス化されているピット部の周囲に対する明るさが SIM の2次電子像と SEM の2次電子像で逆転していることがわかった。また, SEM の反射電子組成像ではピット部とその周辺の場所で明るさに変化が無い。これは原子番号の違いではなく, 結晶構造の違い(結晶, アモルファス)によるコントラストも逆転する可能性を示しているが, さらに詳細な実験を要する。

図7 SEM像(上)とSIM像(下)の原子番号コントラストの比較
SIM像とSEM像ではコントラストの原子番号依存性が逆転していることがわかる。

SIM像を観察装置として応用するためには、これらのコントラストのSEMとの違いをあらかじめ理解しておく必要がある。

6. ま と め

SIM像の特性(最表面の情報が得られる, チャンネリングコントラストが顕著である)を十分に理解することにより, FIBを観察装置,あるいはSEM観察およびEDS分析などの補助手段として有効に活用することができる。特にSIM像でのチャンネルコントラストはSEMのそれに比べて非常に顕著であり, めっきの組織評価, 金属組織の観察などの分野での応用が期待できる。ただし, 4, 5に示した通り, チャンネリングコントラストの加速電圧依存性とコントラストの原子番号依存性はSIMとSEMとで違った現象であることをあらかじめ理解しておく必要がある。また, 同じ場所を長時間に渡り連続観察すると表面がスパッタリングにより加工され, ダメージの原因となるので注意が必要である。

(2002-9-9 受理)

図8 CD-RWの信号入力部(ピット)のコントラスト比較
CD-RWのアモルファス化されたピット部を加速電圧30 kVのSIM像と加速電圧3 kVのSEM(2次電子および反射電子組成像)で比較した。

文 献

- 1) Nikawa, K ; *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9**(5), Sep/Oct 1991
- 2) 裏 克巳 ; 電子光学, p. 183 (共立出版, 1979)
- 3) Ion Implantation, Sputtering and their applicatin, p. 304-316
(ed. by P. D. Townsend, J. C. Kelly and N. E. W. Hartley, Academic Press, London 197)
- 4) Y. Sakai, T. Yamada, T. Suzuki, T. Sato, H. Ito and T. Ichinokawa ; *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 611 (1998)
- 5) M. Kudo, Y. Sakai and T. Ichinokawa ; *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 3475 (2000)
- 6) T. Kikukawa and H. Utsunomiya ; *Microsc. Microanal.*, **7**, 363-367 (2001)