原 著 論 文 (1)

画 像 デ ー タ 処 理 シ ス テ ム ——SAM データを主として——

西守 克己・徳高 平蔵・石原 永伯・渡部 靖彦・岸田 悟

鳥取大学工学部電気電子工学科 〒680 鳥取市湖山町南 4-101

(1989 年 12 月 25 日 受理)

Development of an SAM Image Processing System

Katsumi NISHIMORI, Heizo TOKUTAKA, Naganori ISHIHARA,
Yasuhiko WATANABE and Satoru KISHIDA

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Tottori Univ.
Koyama, Tottori 680

(Received December 25, 1989)

An image processing system using a microcomputer was introduced to a scanning electron microscope (SEM) and scanning Auger electron microscope (SAM) apparatus. This system was constructed more compactly and inexpensively than using a commercial image processing system. Noise reduction and feature extraction were achieved by using this system in processing the SAM image of several small areas of Au deposited on a Cu substrate. A bird's eye view mapping was also useful for enhancing the density distribution of the Au deposits. In addition, in order to obtain the true SAM images, we developed an image subtraction method which uses the values of peak-to-peak intensities of Auger $dN(E)/dE$ signals.

1. はじめに

最近では、表面分析において局所的な元素分析や表面元素の濃度またはその化学結合状態を知ることが必要になってきている。このためコンピューターを用いた2次元、3次元画像データ処理方法が導入されている^{1,2)}。しかし多くの画像処理装置は表面分析装置への応用に対してはほとんど配慮されていない。その主な原因として表面分析では装置自体の性能に依るところが大きく、それぞれの性能、機能に合わせた画像データ処理が要求されるからである。また汎用の画像処理システムを導入すると大型となり、高価となる。そこで我々は SEM (走査型電子顕微鏡)-SAM (走査型オージェ電子顕微鏡) 装置において精細な画像の記録および表示、像情報の利用、および、独自の付加機能の開発が出来るマイクロコンピュータを使った画像処理システムを製作した。

2. 画像処理システムの構成

Fig. 1 に、表面分析装置としての SAM-1000 S (島津製作所製) を含めた画像処理システムを示す。このシステムは、大別して (A) SAM-1000 S 装置、(B) SAM-1000 S 制御部、および (C) マイクロコンピュータ画像処理システムの3つからなる。SAM-1000 S 装置 (A) から得た SEM あるいは SAM 像データは、制御部 (B) により、 352×400 画素、4096 階調のデジタルデータに変換される。そして8ビット・パラレルのデータバスにより、マイクロコンピュータに転送された後に種々の画像処理が行なわれる。以下 (A) ~ (C) について詳しく述べる。SAM-1000 S 装置 (A) は SEM 像または SAM 像をマニュアル動作により6インチ CRT 画面上に写し、写真撮影できる。SEM では二次電子 (SE) 像と吸収試料電流 (SC) 像が観察でき

Fig. 1 A block diagram of the image processing microcomputer system for the SAM-1000S apparatus.

る。SAM では、微分 ($dN(E)/dE$) モードと積分 ($N(E)$) モードが選択でき、測定対象となる元素のマッピングができる。

Fig. 1 中 (B) の部分は SAM-1000 S 制御部である。これにより、SAM-1000 S の 135° 静電偏向型電子分析器の分析電圧、一次電子ビームの走査磁界電流を制御し、データ信号を A/D 変換することによってデジタル信号としてコンピューターに取り込むことができる。制御部はワンボード・マイクロコンピューター（以下ワンボードマイコンと略す）とインターフェイスボードから成る。ワンボードマイコンには、モトローラ社のマイクロプロセッサ MC 68000, ROM (64 K バイト) RAM (256 K バイト), プリンターインターフェイスおよび RS-232 C インターフェイスで構成される。インターフェイスボードは分析電圧制御用の 16 ビット D/A 変換器、電子ビームの X 軸、Y 軸の走査制御用の 12 ビット D/A 変換器、SEM-SAM データ信号の A/D 変換用の 12 ビット A/D 変換器、ビーム走査とデータ収集のタイミングをとるためのプログラマブル・タイマー・モジュール PTM、データ入出力用の周辺部インターフェイス・アダプター PIA で構成される。

Fig. 1 中 (C) の部分は 16 ビットマイクロコンピューター V-68000 画像処理システムを示している。このシステムはモトローラ社の 16 ビット MPU-MC 68000 の標準バスとして開発された VME バスを使っ

て作られている。VME バス上のシステム全体は MPU モジュール、画像処理 VIP (Video-Image-Processor)、画像メモリーの FRAM (Frame-Memory) モジュール、並列インターフェイスモジュールおよびフロッピーディスクドライブ FDD 用モジュールから構成されている。MPU モジュールはトーヨーデータ社製の TVME-100 で、主に MC 68000 MPU と端末用 RS-232 C ポート、1 M バイト RAM で構成されている。RS-232 C ポートにはパーソナルコンピューターを接続し、簡単な 2 値画像処理もできる。VIP モジュールはメック社製の MEC-1713 で、画像データの入出力やモニター出力など FRAM モジュールをコントロールする機能を持っている。そのため、このモジュールには、一般の画像入力用の CCD カメラや画像表示用のモニターが接続される。FRAM モジュールは、MEC-1714 で画像データを記憶する働きを持っている。これは 256 K バイトの容量があり、 512×512 画素で 256 階調の解像度を持たせることができる。並列インターフェイス・モジュールは、トーヨーデータ社製の TVME-410 である。20 ビットのポートが 2 チャンネルあり、それぞれプリンターやプロッター、そして SAM-1000 S コントロールシステムへ接続されている。フロッピーディスク制御用 FDC モジュールはトーヨーデータ社製 TVME-400 で、フロッピーディスクドライブ FDD (3.5 インチ用) を 2 台制御できる。これらのシステムを用いて行なった SAM に

おける画像データ処理の応用例を以下に示す。

3. 実験装置

実験に使用した SAM-1000 S 装置の性能について述べる。電子銃は LaB_6 フィラメントを使用し、収束および対物レンズはいずれも磁場型コイルで構成されている。加速電圧は最高 30 kV までで、 $1\ \mu\text{A}$ までの1次電子ビーム電流がとれる。ビームスポット径は SEM では加速電圧 10 kV、ビーム電流数 nA で $1\ \mu\text{m}$ 程度、また SAM では加速電圧 10 kV、ビーム電流数百 nA で $10\ \mu\text{m}$ 程度となる。SEM および SAM の測定における1画面(フレーム) 352×400 画素の像を得るのに要する走査時間は、通常 SEM では 16 秒、SAM では 64 秒であるが、任意に設定可能である。試料の位置を動かさずに、SEM、SAM 時の観察領域の移動および、ある1地点での AES ポイント分析のビーム位置決めをジョイスティック装置により行なうことができる。また、二次電子あるいはオージェ電子の線上強度分布を求めるライン分析のため、ビームのライン走査を行なうことも可能である。SEM の二次電子検出はシンチレータと光電子増倍管で行なっている (SE モード) が、一方試料吸収電流像 (SC モード) も観察することができる。吸収電流像は二次電子像の明暗を反転したコントラストとなる。SAM における電子分析器は、 135° 静電偏向型アナライザーを使用している。自動設定掃引電圧

幅は、20~1600 V までであり、掃引の最小ステップ電圧は 0.1 V である。手動により掃引電圧は 3000 V まで可変となる。電圧掃引速度はオージェ信号のロックインアンプにおける時定数により設定できる。分析器軸上に沿って置かれた試料面に対する電子の入射角は約 45° である。試料は試料導入室からエアロック・システムにより搬入および取り出し交換できる。SAM、SEM 分析時の真空度は約 $3 \times 10^{-7}\text{Pa}$ である。

4. 画像処理の実験例

4.1 ピーク・ピーク強度による SAM 像の表現

SEM 像では固体表面の形状を主に示しているが、SAM 像は SEM 像と直接対応する形で表面構成元素の濃度分布状態を表わすことになる。SEM 像の画像処理については近年急速に進展している¹⁾ が、SAM 画像処理は取り扱う表面構成元素も多種にわたることや、オージェ電子の発生や放出の機構、電子の平均自由行程など考慮すべき問題点³⁾ が多く、最近やっと種々の表現法、処理法²⁾ が試みられるようになってきた。前にも述べたようにオージェ電流の測定方法には積分 $N(E)$ モードと微分 $dN(E)/dE$ モードがあったが、我々の場合 $N(E)$ モードは感度の点で十分ではないので、 $dN(E)/dE$ モードでの実験例を示す。このモードでは、微小なオージェ電流をロックインアンプで増幅することにより、その出力電流により SAM 像のコントラストを得ている。

Fig. 2 (a) Auger graphs and (b) an SEM image taken from the Ag-Cu double mesh sheets.

Fig. 2 には, Cu の 100 メッシュ・グリッド, およびその下にある Ag の 400 メッシュ・グリッドの 2 重グリッドからの (a) オージェグラフと (b) SEM 像を示す。Cu および Ag メッシュからのオージェグラフをそれぞれ点線と 1 点鎖線で示した。Cu の高エネルギーピーク (920 eV) では感度が十分ではないのでここでは取り扱っていない。Cu では低エネルギー側ピーク (62 eV) は感度もあり, 表面敏感でもあるが, 大きなバックグラウンド上に乗っているのが難点である。C および S の表面不純物も少し存在する。Ag は十分な感度を持っているように見える。これらはオージェ点分析によって同じ感度で測定されたものである。実線のオージェグラフは Ag 400 メッシュの図 (b) で黒い正方形の空間部

の中心で測定されたが, ビーム径端が Ag メッシュにかぶったため Ag の信号が検出されている。またこれらの測定においてオージェグラフのバックグラウンドは測定点毎に変動しているため, SAM 像の濃度の直接比較は困難となる。特に低エネルギー側ではそれが著しい。微分モードでは, オージェ信号強度としてピーク・ピーク強度をとるのが普通である⁴⁾。そのため次のような SAM 像の画像処理を行なってみた。

Fig. 3 (a) および (b) では, 360 eV 近辺での平坦なバックグラウンドを濃度基準値 0 とし, 正ピーク側に -2047 階調, 負ピーク側に +2048 階調で, それぞれ Ag の 349 eV 正ピークおよび 357 eV 負ピークのオージェ信号電流を使って SAM 像のマッピングを行なった。

Fig. 3 Ag SAM images corresponding to the SEM image of Fig. 2 (b). The Ag images of (a) and (b) were taken at 349 eV positive and 357 eV negative Auger peaks of Fig. 2 (a), respectively. The image (c) was obtained by subtracting the image (b) from the image (a).

Fig. 4 Cu SAM images corresponding to the SEM image of Fig. 2 (b). The Cu images of (a) and (b) were taken at 57 eV positive and 62 eV negative Auger peaks of Fig. 2 (a), respectively. The image (c) was obtained by subtracting the image (b) from the image (a).

試料は Fig. 2 の Ag-Cu 2重グリッドである。プリンター出力画像であるため濃度階調は 16 階調となっている。それぞれの図において、Ag のメッシュ部分は (a) では黒くふちどりされ、(b) ではやや白くふちどりされている。それぞれの濃度画像の差 (a) - (b) をとれば、Fig. 3 (c) の画像となり Ag のグリッド形状のみが明瞭に浮かび上がってくる。この画像はピーク・ピーク強度による Ag のオージェ信号強度で表現されており、同時にバックグラウンドの基準値は各画素点において相殺されるので、その影響が現われてこない。Cu の低エネルギー側ではバックグラウンドが大きく変化しているので、この引算の効果がもっと明確に示される。それを Fig. 4 に示す。これは Cu オージェ信号について行なったもので、上述の Ag の場合と同様の操作を行っている。同図 (a) および (b) は、それぞれ Cu の低エネルギー側の 57 eV 正ピーク、および 62 eV 負ピークでの SAM 像である。これらの場合、Fig. 2 (a) での実線すなわちスペース部のオージェグラフにおいて、57 eV および 62 eV の値をそれぞれ Cu の低エ

ネルギー域でのバックグラウンド基準値とみなしてマッピングを行なった。Fig. 4 (a) では暗い大きな Cu グリッド枠組の中にやや白く Ag グリッド模様が見られる。一方、同図 (b) では Cu と Ag グリッドとが同じ白のコントラストで表わされており、バックグラウンドの影響が著しい。したがって Ag と Cu の領域の識別が困難である。同じく Fig. 4 (b) の図中上部に Cu グリッドの枠組の一部周辺部が白く浮き上がって見えるが、これは、グリッド周辺部での表面形状の変化により二次電子およびオージェ電子の数や放出角が変化していることによると考えられる。Fig. 4 (c) すなわち同図 (a) - (b) の差画像では、はっきりと Cu のグリッド枠組だけが現われ、明らかにバックグラウンドによる影響は取り除かれている。

4.2 SAM 像における領域指定——エッジ検出——

SEM-SAM データを画像処理する最終的な目的は、それらの像の意味する内容を理解すること、つまり画像認識にある。しかし、前節で示したように得られた像をそのままの形で理解することは容易ではない。一般に画

Fig. 5 (a) An Au SAM image was obtained by subtracting the image of Au 59 eV positive Auger peak from the image of Au 72 eV negative Auger peak with the same procedures as were carried out in Figs. 3 (a) and 4 (a). Au was deposited on Cu substrate through a mesh mask with circular holes. The images of (b) and (c) were produced from Fig. 5 (a) by using the differential filters of Figs. 6 (a) and (b), respectively. The image (d) was taken from Fig. 5 (a) by using both the 2×2 differential filter of Fig. 6 (a) and the 3×3 nonlinear thinning filter of Fig. 6 (c).

像認識を行なうには、雑音やぼけあるいは歪を取り除き、画像を見やすくするとともに画像の特徴をより強調し、認識を行ないやすくする必要がある。そのため、SAM 像の領域指定を行なった例を Fig. 5 に示した。これは、Cu 基板上に Au を 200 メッシュ円孔グリッドのマスクを通して蒸着したものを試料としている。Fig. 5 (a) は前節と同じく、低エネルギー側における Au オージェ信号の 59 eV 正ピークと 72 eV 負ピークとの差画像である。この図において、円形の Au 蒸着領域でのエッジ検出を行ない、その領域を示す輪郭線を得ようとするものである。一般に画像のエッジを検出するには、画像を空間微分すればよい⁵⁾。その際、各画素の濃度 $f(i, j)$ の微分は差分 $\Delta f(i, j)$ で表われ、 x 及び y 方向での濃度変化 $\Delta_x f(i, j)$ 及び $\Delta_y f(i, j)$ の和で与えられるとすれば、

$$\begin{aligned}\Delta f(i, j) &= \Delta_x f(i, j) + \Delta_y f(i, j) \\ &= [f(i+1, j) - f(i, j)] \\ &\quad + [f(i, j+1) - f(i, j)] \\ &= -2 \cdot f(i, j) + 1 \cdot f(i+1, j) \\ &\quad + 1 \cdot f(i, j+1)\end{aligned}\quad (1)$$

となる。それ故、我々は Fig. 6 (a) に示した最も簡単な 2×2 一次微分フィルタマスクを使用した。このマスクを用いた画像処理によって得られたのが Fig. 5 (b) であるが、この場合ただ単に微分だけではエッジ強調の効果が得られていない。その原因として、後述の Fig. 7 (a) でみられる円形領域内での小さな濃度変化や雑音があげられる。そこで、これらの影響を除去するため原画像 Fig. 5 (a) で平均化する領域を 5×5 画素と広げ、それら平均値の x, y 方向での微分(差分)をそれぞれとった。すなわち、Fig. 6 (b) で示される 5×5 平均値微分フィルタマスクを用いた。このマスクでは、中心画素 A での値を、

$$\begin{aligned}& \{ (a \text{ 領域の画素の平均値}) \\ & - (b \text{ 領域の画素の平均値}) | \\ & + | (c \text{ 領域の画素の平均値}) \\ & - (d \text{ 領域の画素の平均値}) \} / 2\end{aligned}\quad (2)$$

とする。その処理結果を Fig. 5 (c) に示す。これにより円形領域の輪郭線が明瞭となっている。このほかに前述の 2×2 一次微分フィルタ処理を補助するプログラムとして、微分により取り出されたエッジをより強調する細線化プログラムを作成した。このプログラムでは、エッジ部が Fig. 5 (b) のようにはっきりと得られていない場合、そのエッジ部を強調する(細線化)効果をもつ。すなわち、Fig. 6 (c) に示すように着目画素 A の上か下かに着目画素より大きい値の画素があり、かつ左右についても同様な画素が存在すれば、着目点の濃度

Fig. 6 (a) 2×2 differential filter, (b) 5×5 smoothing and differential filter, and (c) 3×3 nonlinear thinning filter. When filter (a) is used, the density of each pixel is weighted with the value labeled in the box. Using filter (b), the following two procedures are performed. At first, the averaging of the densities over the four 5×5 pixel areas neighbouring on the central pixel A. Their averaged values are a, b, c and d . Next, we obtain the density at A pixel by calculating the definition of $(|a-b| + |c-d|)/2$. Let us explain the 3×3 nonlinear thinning filter. Here we consider 3×3 pixels like (c). The marked $\times$ pixels are not considered and only $\circ$ marked pixels are taken into account for simplicity. When at least, one of the densities among $\circ$ marked pixels is larger than that of A, the density at A is defined as zero. Otherwise, the density of A is taken as the representative among 3×3 of 9 pixels.

を 0 とし、それ以外の場合には着目点の元の値を用いる。ここでの処理は 2×2 一次微分フィルタ処理を行なったあとに上の細線化処理を続けて行なった。結果を Fig. 5 (d) に示した。エッジはざらついているが、輪郭は明瞭である。Cu 試料面の引っ掻きキズ上における Au 蒸着物の凸凹(円形領域内)が、Fig. 5 (c) よりも強調されている。したがって、簡単に Au 蒸着領域(円形領域)を指定したい場合には、Fig. 6 (b) の 5×5 平均値微分フィルタ処理が、そして円形 Au 領域およびその内部のキズによる輪郭線をも得たい場合には、Fig. 6 (a) の一次微分フィルタおよび (c) 細線化の二段階処理が有効である。

4.3 SAM 像における画像表示と雑音除去

前節のように比較的簡単な SAM 像の場合には、その特徴抽出は容易である。しかし、画像表現の仕方によっては、雑音画素が障害になる場合もある。雑音除去の基本は近傍画素による平滑化であるが、単純に平滑化するだけでは雑音と同時にエッジ成分なども失ってしまう

ため、如何に雑音だけを除去しエッジを残すかということがポイントとなる。画像の濃淡を線の高低で画素上に表現し、3次元的に表示する鳥瞰図法がある。これを用いて前掲の Fig. 5(a) の Au-SAM 像を表わしたのが Fig. 7 (a) である。走査線密度が少ないと、縦方向の分解能は減少するが、横方向の濃度分布は線の高低で表わされ大幅に改善されている。それに伴い、各走査線上の雑音ピークが多く発生している。そこで、雑音除去のため平滑化フィルターとして、Fig. 8 の (a) 3×3 および (b) 5×5 の移動平均フィルターを用いて、それぞれ処理を行なったのが Fig. 7 (b) および (c) である。Fig. 7 (b) および (c) ではほとんどの雑音ピークは除去されているが、平滑化に用いた 3×3 および 5×5 の近傍画素数の増加とともに、円形周辺部での立ち上がり角が鈍り、また円形内部での小さなピークも消失ようになる。これは、このような線形フィルターでは雑音とエッジ成分とを区別できないためである。雑音を選択的に除去でき、画像の局所的性質をとらえられる非線形フィルターの一つである 5×5 方向性平均フィルターを Fig. 8 (c) に示す。このフィルターによるエッジ検出の方法⁶⁾としては、同図 (d) のフローチャートに示すように、まず l_1 から l_4 までの各方向での5画素毎の分散を求め、その値が最も小さい方向をエッジが存在する方向と決め、その方向に沿った5画素値を用いて平滑化を行なう。しかし、その時、分散の最低値が所定の上限值 K より大きい場合には、全ての方向においてエッジが存在しないと定義し、Fig. 7 (b) と同じ 5×5 平滑化

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 8 (a) and (b) are the 3×3 and 5×5 smoothing filters, respectively. (c) shows the 5×5 directional smoothing filter. These noise filters were used in Fig. 7. Flow-chart (d) shows the smoothing procedure of the (c) filter.

(a) 59-72eV Au SAM

(b)

(c)

(d)

(e)

Fig. 7 (a) The bird's eye view for the Au SAM image of Fig. 5 (a). (b), (c) and (d) images were produced from the image of Fig. 7 (a) by using the noise filters of Figs. 8 (a), (b) and (c), respectively. The image (e) was obtained by using the 3×3 median filter which has a function that, when the densities of 9 pixels are arranged in order of height, the median among them is defined as the output of this smoothing procedure.

を行なう。Fig. 8 (c) の 5×5 方向性平均フィルターによる処理例を Fig. 7 (d) に示した。Fig. 7 (c) よりもエッジの立ち上がりが急峻になっているのと円形内部での小さなピークが再現されているのがよくわかる。

この他に雑音除去でよく用いられているものにメジアンフィルターがある。これも非線形フィルターであり、一般に画像の雑音は極端に高い値あるいは低い値に偏り、中間的な値をとることが少ないという性質を利用する。ここでは、 3×3 正方領域内の画素 9 個の濃度値を大きさの順に並べ、そのメジアン (中央値) をとることにより雑音を除去した例を、Fig. 7 (e) に示した。これもエッジを保ちつつ、雑音を除去する方法として知られている。Fig. 7 (d) と比べると、円形エッジでの立ち上がりがほとんど変わらなくて、雑音もよく抑えられているが、その分、円形内部での小ピークが少し抑制されて見える。したがってこの場合、Fig. 8 の (c) 5×5 方向性平均フィルターおよび前述の 3×3 メジアンフィルターの両処理は、原画像 Fig. 7 (a) の平滑化をほぼ忠実に行なっている。しかし、とくに円形内部での Au の濃度分布を詳しく知りたい場合には、 5×5 方向性平均フィルター処理の方が有効と思われる。

5. ま と め

SEM-SAM 装置である SAM-1000 S にマイクロコ

ンピューター画像処理システムを構成し導入した。市販の汎用画像処理システムとは異なり、小規模で安価に構成することができた。それを用いて、Au 蒸着パターンの SAM 像の画像処理を行い、雑音除去や特徴抽出の機能を十分発揮できること、および画像表示の鳥瞰図法による画像強調の応用例を示した。さらに真の SAM 画像を得るために、オージェ信号のピーク・ピーク強度を用いた差画像法といった独自の機能を持たせることもできた。

この論文において、鳥取大学工学部共同利用の複合型表面分析装置 SAM-1000 S を使用させて頂き、感謝致します。

文 献

- 1) 於保英作, 荻原昭徳, 金谷光一: 表面科学 **9**, 16 (1988).
- 2) 大岩 烈, 田中彰博: 表面科学 **9**, 55 (1988).
- 3) C. G. H. Walker, D. C. Peacock, M. Prutton and M. M. El Gomati: Surf. Interface Anal. **11**, 266 (1988).
- 4) N. J. Taylor: Rev. Sci. Instrum. **40**, 792 (1969).
- 5) 田村秀行: “コンピュータ画像処理入門” (総研出版, 1985) 第 5 章.
- 6) 尾崎 弘, 谷口慶治, 小川秀夫: “画像処理” (共立出版, 1983) p. 150.