

## トランジスタ素子の非破壊・内部観察

——画像処理——

竹野下 寛・林田惣一郎

長崎大学 教育学部  
(1997年10月31日受理)

Nondestructive Internal Observation of a Transistor Chip as a Specimen

——Image Processing——

Hiroshi TAKENOSHITA and Souichirou HAYASHIDA

Department of Technology, Faculty of Education,  
Nagasaki University, Nagasaki 852

(Received October 31, 1997)

トランジスタ素子を試料に、電子線超音波顕微鏡を使って非破壊・内部観察を行ってきた。画像は写真フィルム（白黒）への記録と平行して、映像信号をパソコンを使ってデータの取り込みを行ってきた。取り込み画像データは12ビット、448kbであるにも関わらず、OSがMS-DOSの場合、640×400ドットの画面に、512×330ドット、16色での表示し could not be displayed. 今回は、OSにはウィンドウズ95を選択し、取り込み済みデータを使って、1024×768ドットの画面に32色、微細な画面での表示を試みた。その結果、DOS版の16色表示と比べ、(1)32色表示はよりスムーズな色変化と、(2)DOS版より微細な画面が得られた。さらに多色での表示も可能であることが分かった。しかし、ウィンドウズ95であっても、未だ取り込み済みデータの1部しか使用できていない。

Using electron-acoustic microscopy, we have observed many kinds of transistor chips as specimens. Microscopic images were recorded onto black and white films and floppy disks, by a personal computer, under operating system of MS-DOS. The data that we obtained consisted of 12 bits and 448 kb/flame. When under MS-DOS as a operation system (640×400 dots/plane), the image is displayed with only 16 colors and a image area of 512×330 dots. In this study, under Windows 95 (1042×768 dots/plane), we attempt to build the image with 32 colors and fine image on the display monitor of a personal computer. Results that we obtained were described under, (1) the images with 32 colors which are obtained by a smooth color change and (2) fine images which are displayed, compared with MS-DOS cases. We understand there is a

good possibility that the images will be displayed with more colors in the future, but we can only a small percentage of the data under Windows 95.

## 1. はじめに

電子線超音波顕微鏡 (electron-acoustic microscopy, EAM) は断続電子線を試料に照射して、発生した音波を試料内を伝播させたのち音波を検出することで、非破壊で試料内部が観察可能な方法として1980年に Cargill<sup>1)</sup>及び Brandis and Rosencwaig<sup>2)</sup>によって同時に提案された。

断続した電子線を試料に照射したとき、試料は電子線照射時には加熱され膨張する、非照射時には冷却し収縮することになる。これは、断続電子線の照射で試料が膨張・収縮を繰り返すことになる。試料の膨張・収縮の繰り返し (熱波<sup>2)</sup>) は試料内を伝播中に音波に変換され、音波は試料内を伝播した後に、試料裏面に取り付けられた圧電性素子により電気信号として検出される。検出された電気信号 (EA信号) は、照射電子線の断続周波数に同期したロックインアンプで増幅される。走査型電子顕微鏡 (SEM) による電子線照射、電子線走査の機能を使い、検出・増幅した信号を映像信号としてCRTに表示させると、電子線超音波像 (EAI) が得られる。このように、EAMは通常のSEMに電子線断続装置、音波の検出器、信号増幅装置を付加して構成される。我々は、これらの付加装置を製作することでEAM装置を実現してきた。<sup>3-14)</sup>

本構成法によるEAMを用いるとすれば、まず、SEMモードを使い各種の「表面情報」を得て観察場所を選択した後に、EAMモードに切り替え、SEMモードで選択した「同一場所」について試料を移動させることなく非破壊・内部情報を取得することが可能となる。<sup>3-14)</sup>即ち、通常のSEMモードからEAMモードへとモード切り替え操作のみで、試料の移動を伴わずにSEMモードで選択した特定場所を、表面 (SEMモード) と内部 (EAMモード) の両情報を非破壊で得ることが可能な手法である。

これまで、EAMを使い各種の半導体デバイス、LSIを試料に用いて非破壊・内部観察してきた。検出・増幅したEA信号は2分され、白黒フィルムによる通常の記録と、画像データをパソコンを使って取り込むことを同時に実施してきた。すなわち、その画像データから通常の写真観察では得られない情報が求められないかと考え、パソコンでのデータの取り込み・保存を行ってきた。

EAM画像信号 (アナログ信号) をパソコンで取り込むにあたって、当初、パソコンは16ビット、画面は (640×400) ドット、8色表示、の機種であった。しかし、将来のパソコンの機能拡張を見込み、当時所有した装置のもつ機能が将来も最大限利用できるように計画した。また、EA信号の増幅用に製作したロックインアンプは周波数1 MHz、2チャンネル出力である。<sup>3-14)</sup>

計画は

- (1) 画像取り込みエリアは、SEMの画像表示CRT画面と一致しなければならない。
- (2) SEMの写真記録とデータ取り込みは並列接続で平行して行う。
- (3) ロックインアンプの出力信号は in-phase, out-phase の2チャンネルとする。
- (4) A/Dコンバータは12ビット、2チャンネルで使用する。

とした。

使用したSEMの電子線走査範囲は広く、試料上を走査する全エリアの1部分をCRTに表示するように設計されている。即ち、試料面を電子線は表示画面以上に“オーバースキャン”しており、(a)そのエリア内で直線性が良く歪みの少ない、(b)SEM鏡体の光学軸を中心としたエリアを満たすように必要に応じて調整・選択され、観察用と写真撮影用の2台のCRTに同じエリアが同時表示されるように設計されている。それ故、パソコンを使ってデータを取り込むにあたって、水平の取り込み開始位置、垂直の取り込み開始位置ともに、電子線が試料面を走査するための走査信号のトリガーをそのまま使用することはできない。それ故、水平取り込み開始位置は、SEMの表示画像に合わせ、電子線の水平走査信号をコンパレータで比較させて水平取り込み開始位置を定めた。その位置から、水平方向に512ドット分カウントしたのち折り返すこととした(第1表参照)。<sup>6)</sup>

垂直方向の取り込み開始位置についても、同様にコンパレータで比較してSEM画面に合わせて開始位置を定めている。取り込み終了については、A/Dコンバータの取り込み可能な水平走査線数が480本であるため、SEMの表示画面内で480本分の走査線となるように調整した。しかし、SEM画面とパソコン画面上の縦横比を同一に保つために、水平走査線15本ごとに1本の割合で取り込みをせず、取り込み水平走査線総数448本で1画面分のデータとしてフロッピーディスクに記録した。これは、取り込んだデータをパソコン表示させた時、条件(1)のSEMのCRT画面の縦横比はアナログの写真像と一致しなければならぬ為である。それ故、パソコンでのディスプレイは(640×400)ドット画面に対して、水平512ドット、垂直330ドットしか利用できなかった。この様子を第1、2表に示している。

このように、旧来から記録してきたデータは12ビット分保存しているにも関わらず、疑似カラー表示は16色までに止まっていた。そこで、今回はパソコンのOSをMS-DOSからウィンドウズ95に変更し、従来の取り込み済みのデータを使って、16色以上の色での表示とウィンドウズ95による高解像度画面を使った微細な表示を試みた。

## 2. 実験方法

DOS版で取得済み画像データのデータ構造は1画面について、512(横)×448(縦)×2(バイト)=448kbとなる。A/Dコンバータでは1画素当たり16ビット使用されており、この内、下位4ビットはA/D変換時にボードの設定、動作に使用され、上位12ビットが画像の変換データとして利用できる。

次に数値表現した後の数値と疑似カラー表示のための配色については、既存のMS-DOSシステムに準じる形で行った。そこで、従来の2倍の疑似カラーとすることにして32階調で実施した。これは、フルカラー化とすると、(a)中間調の発色のために、パソコン側で自動的にタイルパターンが使用されてしまうこと、(b)取得済みの画像データの質がさほど良くないこと、などの為である。色の定義は「2-3. グラデーション」で述べる。

開発環境は以下の通りである。

ハードウェア パーソナルコンピュータ : NEC PC-9821Xa16  
1024×768ドット画面, ハイカラー(16ビット)表示設定

ディスプレイ：ソニー 17sf2  
ソフトウェア OS：マイクロソフト Windows95  
言語：マイクロソフト Visual C++ , Ver. 4.0

## 2-1. 観察試料

今回使用した試料は、外形約 $5 \times 5 \times 0.2 \text{mm}^3$ の大きさで、ヘッダーにマウントされていないだけで電氣的動作は完全なトランジスタ素子である。この素子は5000ケの小さなトランジスタ・エレメントを並列接続して1ケの高周波用電力トランジスタを構成したものである。<sup>9,10</sup>この素子のエミッタとコレクタ電極からリード線を取り出し、エミッターコレクタ間の電子線励起起電流 (EBIC) を測定している。また、コレクタ電極は接地して試料の帯電を防いでいる。

トランジスタ素子は $3^\circ$ で角度研磨<sup>10</sup>がなされており、顕微鏡視野の左上が研磨により多く削り取られ、右下では加工はほとんどなされていない場所を選んで観察した (第1図参照)。このため、表面情報が得られるSEMモードでの像と、内部情報であるEAMモードでの像を同一場所を観察することで比較・検討することができる。

SEMへの試料装着状況、動作条件、測定条件は従来とうりである。<sup>1-14)</sup>

同一場所について、SEMモードでは反射電子像(BEI)、EBIC像を、EAMモードでは電子線超音波像(EAI)の3種の像について、画像データは、DOS版とウィンドウズ95版とで表示した画像を比較することにした。

## 2-2. 画像データ

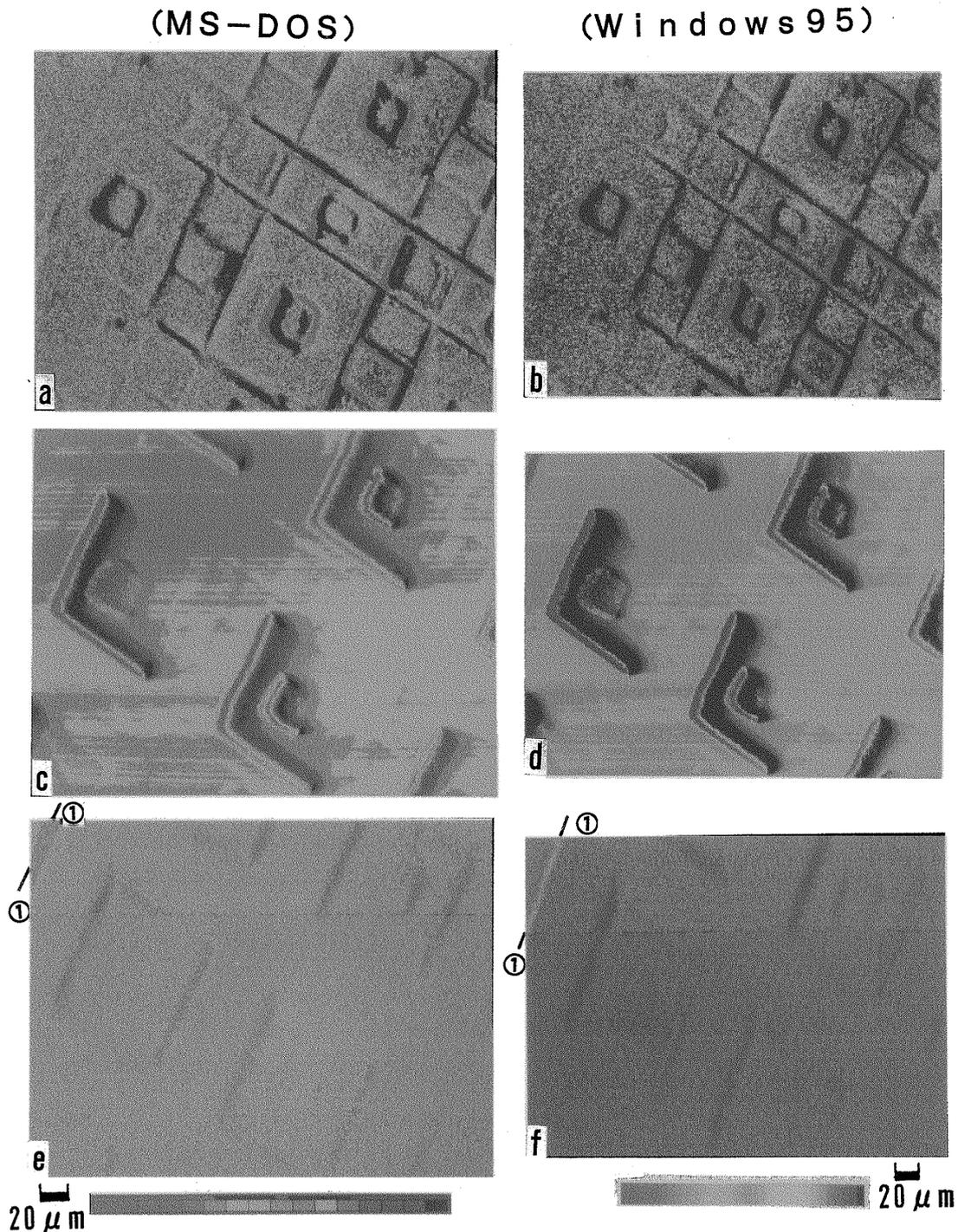
画像データは、従来のMS-DOSで製作されたソフトを使って、従来通りのEAM動作条件：加速電圧20kV、電子線断続周波数1MHzでもって取り込んだ。従ってこのデータはDOS版でのデータ処理、表示 (第1表参照) をする事ができる。

取得済み画像データは、16ビット分あるが、最下位4ビットはA/Dコンバータの動作設定用に割り当てられている。そのため、数値表現するには2バイト(16ビット)単位で下位に4ビット程シフトする必要がある。残り12ビットのデータをウィンドウズ95の画像データとしてビットマップ(BMP)形式に変換して使用する事にした。BMPファイル形式はウィンドウズ95のもとでは(i)標準の画像データ形式であり、(ii)画像表示に使用できるソフトも豊富にあり、かつ、BMP形式に変換さえ出来れば、(iii)他の画像形式に容易に変換可能なためである。

データ変換は、2バイト単位でディスクから呼び出して、下位に4ビットシフトさせて数値化することにした。変換操作は1フレーム分の取り込み済みデータを全容量について変換した。

DOS版データでは、MS-DOSでの画面(640ドット×400ドット)の表示領域に合わせ、データ表示は512ドット(横)×330ドット(縦)で、SEMのCRT画面(120×90mm<sup>2</sup>)の縦横比に一致させている。<sup>9)</sup>即ち、1フレームについて448本分の走査線データが存在するが、その内の118本分は利用されていない。このようにしてCRT表示とパソコンの表示サイズの大きさを一致させている。<sup>9)</sup>この様子を第1表、第2表に纏めている。

ウィンドウズ95では色々な画面モードに設定可能である。今回は、1024ドット×768ドット



第1図 DOS版とウインドウズ95版で表示した写真

トランジスタ素子の同一場所について、各種のモードで得た像を示す。トランジスタは $3^\circ$ で角度研磨がなされており、写真の左上が研磨でより多く削り取ら、右下は加工はほとんどなされていない。

左列にDOS版(DOS)で表示した写真を、右列にウインドウズ95版(Win)で表示した写真を配置している。最上段にSEMモードのBEI(反射電子線像)、中段にSEMモードのEBIC像(電子線励起起電流像)、を並べ、最下段はEAMモードのEAI(電子線超音波像)を並べて表示している。

a: BEI(DOS), b: BEI(Win), c: EBIC(DOS), d: EBIC(Win), e: EAI(DOS), f: EAI(Win)

①-①': コレクターベース間の不純物拡散による伝導度、伝導形の変化する位置。

第1表 SEMとパソコン表示の比較

	SEM/EAM	パソコン取り込み
画像信号	アナログ (1チャンネル)	デジタル (2チャンネル)
画像記録	フィルム (白黒) 50×50mm <sup>2</sup> /枚	12ビット (データ部分) 448kb / フレーム
画像色	白黒	疑似カラー
水平走査信号	アナログ	デジタル
取り込み開始位置	任意	コンパレータ判定
取り込み終了位置	任意	512ドット
走査線本数	任意	448本 (記録分) (注1)
垂直走査信号	アナログ	デジタル
取り込み開始位置	任意	コンパレータ判定
取り込み終了位置	任意	480本 (全水平走査本数) (注1)

第2表 パソコンデータと疑似カラー表示

	パソコン取り込み	疑似カラー表示	
O S	MS-DOS	MS-DOS	
画像信号	デジタル (2チャンネル)		
画像記録	12ビット / 448 kb		
画像色 (疑似カラー)		8色	16色
画面	640×400ドット		
表示画面		(512×330ドット)	
走査線本数	448	330	330

ト、ハイカラー(16ビット)画面の設定とした。ただし、画像データは全てを対象とした変換をしており、水平512ドット×垂直448ドットのBMP形式になっている。即ち、まず、画像データはウィンドウズ95のBMPファイルとして変換する。これは、このBMPファイルを使って、更に微細な表示モードでも表示できるように対応させようとしたものである。データ変換のためのソフトは製作した。

他方、この変換データをビューアでそのまま表示すると縦長の顕微鏡像になってしまう。そこで、縦横比が条件(1)からSEMのCRT表示と同一となるように垂直方向のドット数

第3表 疑似カラー表示する場合の表示ドット数

O S	MS-DOS	ウィンドウズ95
画像データ	(448kb) (448kb)	261kb
画像色	8色 16色	32色
パソコン画面	640×400ドット	1024×768ドット
表示画面	(512×330) ドット	(600×444) ドット
垂直方向ドット数 (水平走査線本数)	330 330	444

注1: SEM (アナログ) の走査線本数480本の内、パソコン取り込み (デジタル) は水平走査線本数15本毎に1本の割合で取り込みをせず、パソコンの取り込みは448本/frameとしている。これは、SEMのCRT表示とパソコン表示画面との縦横比を一致させるための処置である。<sup>6)</sup>

を変更（減少）させている。この為のソフトにはスーパーキッド95を使用した。その際、DOS版の表示画面サイズ（512×330ドット）と見劣らない大きさとする様に、ウインドウズ画面では、顕微鏡画面領域を（600×444ドット）に拡大して表示させている（第3表参照）。

### 2-3. グラデーション

32色のグラデーションを当初の目標とした。疑似カラー表示は信号強度に応じて最小信号値を青、最大信号値を赤として青と赤との中間の配色を定めることにした。

32色のグラデーションを表示したカラーバーは左端（強信号）に赤、中央に緑、右端（弱信号）に向かって青を配置し、左から右端へスムーズな色変化が得られるように中間色をハードウェアで確認しながら進めていった（第1図下のカラーバー参照）。

カラーバーの左端を31番、右端を0番とすると、RGB値で表現してR(赤)、G(緑)、B(青)の強度値を0から255までの数値で選択して中間調の色調を実現した。カラーバーの色の配列をc o l [ ] として、次のようにパレットを定義している。

c o l [31]=RGB(255, 0, 0)	c o l [15]=RGB(0, 255, 0)
c o l [30]=RGB(255, 25, 0)	c o l [14]=RGB(0, 255, 63)
c o l [29]=RGB(255, 47, 0)	c o l [13]=RGB(0, 255, 92)
c o l [28]=RGB(255, 70, 0)	c o l [12]=RGB(0, 255, 146)
c o l [27]=RGB(255, 86, 0)	c o l [11]=RGB(0, 255, 175)
c o l [26]=RGB(255, 114, 0)	c o l [10]=RGB(0, 255, 207)
c o l [25]=RGB(255, 149, 0)	c o l [9]=RGB(0, 255, 232)
c o l [24]=RGB(255, 172, 0)	c o l [8]=RGB(0, 255, 255)
c o l [23]=RGB(255, 191, 0)	c o l [7]=RGB(0, 235, 255)
c o l [22]=RGB(255, 210, 0)	c o l [6]=RGB(0, 188, 255)
c o l [21]=RGB(255, 232, 0)	c o l [5]=RGB(0, 146, 255)
c o l [20]=RGB(255, 255, 0)	c o l [4]=RGB(0, 105, 255)
c o l [19]=RGB(219, 255, 0)	c o l [3]=RGB(0, 77, 255)
c o l [18]=RGB(182, 255, 0)	c o l [2]=RGB(6, 3, 255)
c o l [17]=RGB(146, 255, 0)	c o l [1]=RGB(0, 0, 184)
c o l [16]=RGB(109, 255, 0)	c o l [0]=RGB(0, 0, 86)

## 3. 実験結果

32色用にBMP形式に変換された画像データは224kbとなった。この変換したままのデータをウインドウズ95の1024×768ドット画面に表示すると、縦長の画面になってしまう。これは、取り込みデータの水平走査線数が多いため（第1表参照）である。そこで、ウインドウズ95画面に表示するにあたり、SEMのCRT画面の縦横比に一致するように水平走査線数を等間隔で減少させることで実測しながら使用する垂直方向ドット数（走査線本数）を定めた。さらに、DOS版での表示サイズと見劣らないように拡大して、600×444ドットの表示とした。その結果、ファイルサイズは226kbとなった。使用したソフトはスー

パーキッド95である。その様子を第3表に示した。

DOS版での表示画面(16色疑似カラー)とウィンドウズ95での32色疑似カラーで表示したCRT像を、それぞれカメラで接写した写真を第1図に示した。

第1図での、試料トランジスタ素子は3°で角度研磨がなされており、写真の左上が研磨でより多く削り取られ、右下では加工はほとんどなされていない。この為、表面情報が得られるSEMモードでの像であるBEI(最上段に配置)では、写真の左上は研磨で平坦になり、像パターンが失われているのが観察される。中段にはSEMモードのEBIC像を示している。EBIC信号は接合での照射電子線による起電力量を反映した信号である。それ故、試料表面は平坦であるが、トランジスタ用に形成された接合は研磨によって完全には削除されていない。むしろ、表面電極が削除された結果、電子線が接合に効果的に入射しており、研磨量の多い左上からのEBIC信号が大きいことが観察される。EAMモードのEAI(最下段)では、像が全面から観察される。特に、左上の線①-①'は基板シリコンに不純物拡散された結果、コレクターベース間の電気伝導度と伝導形が変化している位置に対応しており、他のモードでは観察されない。

このように、同一場所からの観察像であるが、3種の像はそれぞれ異なった情報をもたらしている。このことから、研磨したエリアでは表面構造はなくなっているが、内部構造は存在していることが分かる。

#### 4. 検 討

OSをウィンドウズ95に変更して、16色の疑似カラー表示から、32色疑似カラー表示が可能になり、かつ、表示画面の緻密さから、なめらかな色変化をした像を表示できるようになった。色数の増加よりも、なめらかな像の変化が得られることが評価できる。他方、画像データの質によっては、ノイズの目立つ表示となる場合があった。全体的に信号レベルの低い画像データが高品位の表示ができたと判断される。これは表示用パレットを調整することで信号レベルに依存しない対応ができると予測される。

従来のDOS版では640×400ドットの画面に対して、512×330ドットの表示をしてきた。ウィンドウズ95画面の微細さは、ドット間隔が狭く密集させていることにある。今回の様に、DOS版で取り込み済みデータを使用した場合、水平方向には512ドット分の情報しかない。それ故、ウィンドウズ95の1024×768ドット画面上にデータ変換して、512ドット分表示した場合にはドット間隔がせまくなった分だけ全体としての顕微鏡像は小さな画像として表示されることになる。垂直方向にしても、DOS版程ではないが、縦横比を保つためには、やはり取得走査線本数分よりもドット数を減少させねばならなかった。しかも、MS-DOSとウィンドウズ95とでは画面ドット数が縦と横での比率が異なっている。それ故、表示画面の外寸法で一致をはかった今回の方法では、ウィンドウズ95の表示画面は縦長になっている(第1図参照)。表示画面の外寸法で一致をはかった今回の手法には問題があることが分かった。新たに正方形の像データを取得して、これをもとに縦横比、とくに、走査線数を調整する必要があることが分かった。

ウィンドウズ95の特徴を生かすには、ウィンドウズ95上で画像データを取得し、表示する必要があろう。

ウィンドウズ95では、32色に限らず、さらに多色化することが可能である。今回はあえて32色とした。これは、表示する色数分の色を定めた専用のパレットを用意しなければならない為である。専用パレットを指定しないでビューアーに多色表示を指定すると、中間色は自動的にタイルパターンで表示されてしまう。これでは、顕微鏡画像情報としてのパターンか、あるいは中間色表示のためのパターン（タイルパターン）かを、表示したパソコン画面上で判別することは不可能である。このようなことは、ウィンドウズ95が今回のような使用法を想定していなかったと推定され、ウィンドウズ95の持つ便利さと表裏一体となった欠点であろう。

従来使用してきたパソコンはMS-DOS, CPU: V30, クロック周波数: 10MHzであった。これに対して、今回使用したパソコンはウィンドウズ95, CPU: ペンティアム, クロック周波数: 166MHzと後者が圧倒的に処理能力が高い。しかし、今回の様にソフトを製作して計測を行うには多くの困難がともなうことが分かった。

DOS版で取り込んだ画像データの容量は448kb/frameである。DOS版で表示する場合は、専用ビューアーがもととする取り込み済みデータから必要とするデータ分を選択して表示している。それ故、16色表示に要したデータ量は表示できないために取り込み済み容量を記述している(第2表参照)。他方、ウィンドウズ95では、BMP形式に32色のデータとして変換して、通常のビューアーで表示可能にしている。そのため、DOS版の16色表示用のデータ容量よりも、ウィンドウズ版の32色のデータ容量が小さいという結果になっている(第2表参照)。これは事実、フルカラーで変換すると約780kb/frameの容量になることから分かる。

## 5. 結 論

トランジスタ素子を試料に、SEMとEAMを使って非破壊・内部観察を行ってきた。これらの画像データはOSをMS-DOSのもとで12ビットで取得・保存してきた。しかし、DOS版では12ビット分のデータを有しながら16色までしか表示できなかった。そこで、OSをウィンドウズ95へと変更して、12ビットで取得・保存しているデータを活用し、より多色での表示、微細画面表示の実現を試みた。

その結果、以下のことが分かった。(a)32色であるが、よりなめらかな色変化が実現できた。(b)取得済みデータの利用率は向上できた。しかし、その増加量は小さい。(c)画像データは低レベルの場合が良質な表示ができる。(d)画像の縦横比の調整は不十分であった。調整方法を再検討する必要がある。

ウィンドウズ95の特徴を生かして計測に利用するには、ウィンドウズ95上で画像データを取得し、処理した後、表示する必要があること。更に、表示色分の塗りつぶし色による専用パレットを用意する必要があることが分かった。

## References:

- 1) G. S. Cargill III: Nature **286** (1980) 691.
- 2) E. B. Brandis and A. Rosencwaig: Appl. Phys. Lett. **34** (1980) 98.

- 3) H. Takenoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **23** (1984) L680-L682.
- 4) H. Takenoshita: Solar Cells **16** (1986) No. 1-4, 65-89.
- 5) H. Takenoshita: Proc. 6th Sympo. Ultrasonic Electronics, Tokyo, 1985 Jpn. J. Appl. Phys. **25** (1986) suppl. 25-1, pp.194-196.
- 6) K. Sawai and H. Takenoshita: Proc. 7th Sympo. Ultrasonic Electronics, Kyoto, 1986. Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) suppl. 26-1, pp. 241-243.
- 7) H. Takenoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **27** (1988) 1812-1818.
- 8) H. Takenoshita and M. Kobayashi: Jpn. J. Appl. Phys. **28** (1989) L2273-L2275.
- 9) H. Takenoshita: Proc. 11th Sympo. Ultrasonic Electronics, Kyoto, 1990. Jpn. J. Appl. Phys. **30** (1991) suppl. 30-1, pp.253-256.
- 10) H. Takenoshita and M. Kobayashi: J. Electron Microscopy **40** (1991) 369-373.
- 11) H. Takenoshita and M. Tabuchi: Jpn. J. Appl. Phys. **32** (1993) 2521-2524.
- 12) H. Takenoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **33** (1994) 3204-3207.
- 13) H. Takenoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **34** (1995) 2883-2885.
- 14) 竹野下 寛: 長崎大学教育学部自然科学研究報告 第56号 (1997) 41-46.