

研究概要報告書

資料 - 1

(1/6)

研究題名	電子線超音波顕微鏡の解像度向上への試み	報告書作成者	竹野下 寛
研究従事者	竹野下 寛		
研究目的	<p>電子線超音波顕微鏡(EAM)<sup>1,2)</sup>は、試料に断続した電子線を照射した時、電子線の照射・非照射に伴い試料は加熱・冷却を繰り返す。これは熱波が試料内を伝播すると考えることができる。熱波は試料内を伝播中に音波(EA信号)に変換され、音波が試料内を伝播した後に試料裏面にまで到達する。このEA信号は試料裏面に取付けた圧電性検出器(PZT素子)で検出される。この電気信号を照射電子線の断続周波数(f)に同期してロックイン・アンプで増幅する。走査形電子顕微鏡(SEM)の機構を使い電子線走査に同期して、検出・増幅した信号を映像信号としてCRT上に画かせれば電子線超音波像(EAI)が得られる。この様に通常のSEMの機能“各種の表面情報-SEMモード”で観察し観察場所を選択した後に、試料は動かさずに“非破壊・内部観察-EAMモード”に切り替え、同一場所の表面と非破壊・内部観察可能な装置となる。<sup>3-12)</sup></p> <p>最近、MOS-LSIは集積度を向上させ0.3<math>\mu</math>mルールによる製造が開始されたが、これら素子の故障解析には選択場所の非破壊・内部観察が不可欠である。EAMはSEMで観察場所を選択後、モードを切り替え非破壊・内部観察を行う手法であり、この目的には最適な方法と考えられる。</p> <p>しかし、MOS-LSI試料をEAM観察するには、(a)MOS素子の電子線照射による試料損傷の軽減、(b)解像度(r)を向上させて、<math>r \leq 0.3 \mu\text{m}</math>であることが必要となる。</p> <p>我々は、これまでEAM装置の信号検出、増幅系を改良してS/Nの向上を行なうことで、従来からの動作条件であった吸収電流(<math>I_s</math>)を<math>I_s = 8 \times 10^{-10} \text{A}</math>(約1/10、SEMモードの<math>I_s</math>に略同一まで減少)にまで減少させてもEAM像が得られるようになった。さらに、若干のrの向上が実現できた。この改良で、MOS-LSI試料の電子線損傷が減少して(a)の問題は軽減することができた。<sup>10,11)</sup></p> <p>次に問題(b)であるが、我々のEAMのrは動作条件:[電子線断続周波数(f)=1MHz、加速電圧(HV)=30kV]で<math>1.2 \mu\text{m} \leq r \leq 2.4 \mu\text{m}</math>と報告<sup>3)</sup>したが、この値ではLSI観察には不十分である。そこで今回、EAMの解像度向上を求め、MOS-LSIの非破壊・内部観察を計画し、MOS-LSI試料の観察ではっきりと分離観察されるパターン・サイズで解像度の判定を行うことにする。</p> <p>そこで、電子線断続用の駆動電源を改良することで、解像度の向上を計画した。</p> <p>EAMの解像度が改善できれば、SEM像で観察場所を選択した後にEAMモードに切り替え非破壊・内部観察が行える。これは他の手法では得られない方式であり、MOS-LSIの分野のみならず、多くの分野で選択場所の非破壊・内部観察が待望されている。</p>		

研究内容

**実験方法** EAMの解像度を定める主な要因は以下の(1)と(2)である。

(1) 電子線の浸入する深さ(Electron Range, Re)は、Castaingの式<sup>13)</sup>

$$Re = 0.033(HV^{1.7} - V_k^{1.7})A/\rho Z \quad (i)$$

で与えられる。[A:原子量、 $\rho$ :密度、HV:電子線加速電圧、 $V_k$ :K線の臨界電圧、Z:原子番号]

(i)式から、高解像度にはHVを低くしてReを小さくし、EA信号発生領域を小さくする必要がある。〔(注):rは平面、深さ方向とも同じと考えられている〕

我々は、これまでnpn, pnp, ダーリントン形などの各種バイポーラ・トランジスタチップを試料に用いて、EAM観察を行ってきた。EAM動作条件はf=1MHzを一定にして、HVを変数に選び観察を行ってきた。これは、rを保ち、観察可能深さ(tx)の変化に注目したため、HVを高くしてReを大きくすることで、txを増大させることが可能であると報告してきた。<sup>3-8,11)</sup>

試料にMOS-LSIを用いる場合、MOS-LSIの活性領域は表面から数ミクロンの範囲にあり、この深さのtxに対応するには高いHVは必要としないと同時に、HVの低下は(i)式からReが小さくなることになる。これはEA信号の発生領域が小さくなるので、rの向上にもつながるものである。

(2) 照射電子線が試料内でエネルギーを失う時、熱拡散長dtは

$$dt = (4\pi\kappa/\rho Cf)^{1/2} \quad (ii)$$

で与えられる。<sup>1,2)</sup>ここで、 $\kappa$ :熱伝導率、C:比熱、f:電子線断続周波数である。

(ii)式から、観察材料が決まると $\kappa$ 、C、 $\rho$ が定まり、変更可能な変数はfのみとなる。

しかし、我々の装置でfを変更することは、(a)電子線断続装置の周波数上限が1MHzであること、(b)使用するロックイン・アンプが自作の固定周波数(1MHz)であること、の2問題を解決し、高解像度を実現するためには現用のEAMシステムを抜本的に改造しなければならない。特に、問題(a)は現在の磁場偏向方式をやめ、静電偏向などの別方式に変更し、この新偏向ユニットを組み込むためにSEMの鏡体を改造しなければならない。

(3) そこで、f=1MHzは変更せず、電子線の断続が完全にON/OFFとなるように駆動用信号電源の改善に取り組んだ。

我々の現有装置は磁場偏向方式で、コイル(補足説明図④参照)に電子線断続用の周波数f=1MHz、デューティ比50%の矩形波電流を流し、発生する磁界で電子線を偏向することで電子線断続を行っている。この様に磁場偏向ではコイルに矩形波を印加するので、コイルを通過する電流波形には多くの高調波が含まれて電子線は単純なON/OFFの繰り返しではない。これが、従来の我々EAM観察<sup>3-10)</sup>の実状であった。今回はこの駆動用電源の改善を試み、MOS-LSI試料の観察<sup>11,12)</sup>でLSIパターンがはっきりと観察のできるパターン・サイズで評価を行った。

**実験結果** 電子線断続装置の改善は現有装置の改良だけでは実現できなかった。そこで、偏向コイルを駆動する1MHz矩形波用電源(補足説明図⑤参照)を新たに試作・使用した。電源は高速サリスタを使った回路を採用し、コイル電流の高調波成分は大幅

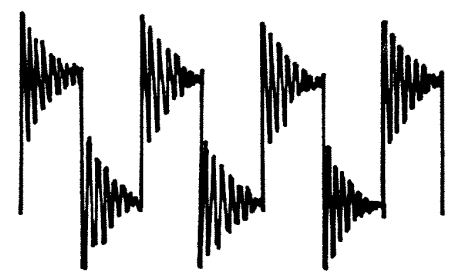
<p>研究内容</p>	<p>に減少できた。この様子をFig.1に示す。新駆動電源によるコイル電流の波形は大幅に高調波が減少している。なお、EAI印画に見られる縦方向（図中のVs方向）の画面全体で線状の等間隔に観察され線は、電源周波数(60Hz)が除去出来ず、これがノイズとなっているものである。</p> <p>Fig. 2(a)は反射電子像(BEI, SEMト)、Fig. 2(b)は表面電極配置図である。図中の①、②は正方形(0.8x0.8<math>\mu</math>m<sup>2</sup>)の繰り返しパターンで、略同一の断面構造を持つが表面に酸化膜層の有るのが①、無いのが②という違いである。</p> <p>Fig. 2(a)と略同一場所を同一倍率でEAM観察した場合をFig. 2(c)とFig. 2(d) [HV=20kV]に示す。Fig. 2(c)には従来装置で得たEAIを、Fig. 2(d)には新駆動電源で得たEAIを示す。0.8<math>\mu</math>m角の繰り返しパターン①がはっきりと観察される。新ユニットを使ってHV=19kVの場合の大倍率での写真をFig. 3に示す。①②のパターンを比較して、Fig. 2(d)の方が明らかに良く、電子線断続用電源(ブランキング・ユニット)の更新は成功したといえる。</p> <p>以上の結果 (A)コイルを流れる矩形波の高調波を大幅に減少させることが出来た。(B)新しい駆動用電源を使い、EAIのrが向上し、従来の解像度<math>r=2.4\mu</math>m<sup>3)</sup>から、0.8<math>\mu</math>mサイズのパターンが明確に分離して観察できるような高解像度が達成出来た。本校では、この結果から解像度<math>r\leq 0.8\mu</math>mと表示することとした。</p> <p>新駆動電源によるコイル電流の波形から大幅に高調波を減少させることができた。しかし、EAIの印画に見られる画面全面の縦線が除去できなくて苦渋している。</p> <p><b>検討</b> 新駆動用電源は高速サイリスタを使った回路であって、コイル電流の高長波成分は大幅に減少できた。これをFig.1に示した。なお、印画に見られる縦方向（Vs方向）の等間隔で線状に全面で観察される（特にパソコンに取り込んだ画面で顕著に現れる）のは、電源周波数(60Hz)のノイズによるものである。しかしサイリスタのゲート駆動信号は、市販パルス・セレクタから供給するために、サイリスタのゲート回路側が接地され、偏向コイルが接続されるカソード側が高電位側に接続されることとなり、誘導などによる電源(60Hz)のノイズを避けにくくしていると推定される。</p> <p>電子線断続用電源を改良することにより、電子線断続用コイルを流れる駆動用矩形波の高調波を大幅に減少させることができた。その結果、EAIの解像度<math>r\leq 0.8\mu</math>mという結果が得られ、従来の我々の装置の<math>r=2.4\mu</math>m<sup>3)</sup>から<math>r=0.8\mu</math>mへと大幅に改善することができた。<sup>11,12)</sup></p> <p>なお、ここでの表示した解像度の数値は試料パターンがはっきりと見分けられる値で表示した。正確な値を得るには、微細に変化するパターンを使って、一般に電子顕微鏡で行われている判定法で判定する必要がある。その場合、今回表示した<math>r=0.8\mu</math>m以上の良い値が得られることになる。EAMの解像度でこれより良い値の報告は見あたらない。</p> <p>一つの試算として、(ii)式は熱拡散長が<math>f^{1/2}</math>に比例して減少することを示している。そこで、今回得られた動作条件：<math>f=1\text{MHz}</math>、<math>r=0.8\mu</math>mとして、0.3<math>\mu</math>mのLSI観察を可能にするための<math>f</math>を求めると<math>f=16\text{MHz}</math>が算出される。この条件は現在の技術水準であらば、全く実現不能な条件では無いであろう。しかし、我々の装置に対しては、偏向方式の変更（補足説明図</p>
-------------	--

研究概要報告書

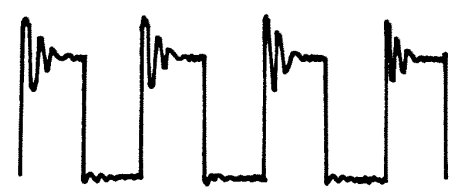
(46)

<p>研究内容</p>	<p>④を静電偏向にすることなど)、ロックイン・アンプ(補足説明図③)の更新など、抜本的な装置改造を伴う条件であるために、今後の我々の装置改善の一つの目標としたいと考えている。</p> <p><b>まとめ</b> 新駆動用電源を用いることで電子線断続周波数断続用コイルを流れる矩形電流波形の高調波を大幅に減少させることができた。その結果、EAIの解像度(<math>r</math>)を従来の<math>r \leq 2.4 \mu\text{m}</math> [<math>f=1\text{MHz}</math>, <math>HV=30\text{kV}</math>]から、<math>r \leq 0.8 \mu\text{m}</math> [<math>f=1\text{MHz}</math>, <math>19\text{kV}</math>]と従来より大幅に解像度を向上させることができた。この成果をもとに、電子線断続周波数<math>f</math>をさらに高周波化することができれば、さらに<math>r</math>が向上し0.3ミクロン・ルールのMOS-LSI観察への応用が可能なが分かった。</p> <p><b>謝 辞</b> 電子線断続用の電源装置製作にあたっては、島谷 孝 氏(サユ-電子㈱)に多大のご協力を、試料構造については小林 睦生 君の協力をいただきました。又、本研究は サウト 技術振興財団の助成によるものである。ここに併せて感謝の意を表します。</p> <p><u>References:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) G. S. Cargill III: Nature 286(1980)691.</li> <li>2) E. Brandis and A. Rosencwaig: Appl. Phys. Lett. 34(1980)98.</li> <li>3) H. Takenoshita: Proc. 5th Pfefferkone Conf., Brugen, Germany, 1986. eds., J. Kirschner, K. Murata and J. A. Venable. Scann. Microsc. (1987) suppl. 1, p. 211.</li> <li>4) H. Takenoshita: Jpn. J. Appl. Phys. 27(1988)1812.</li> <li>5) H. Takenoshita: Proc. 11th Symp. Ultrasonic Electronics, Kyoto, 1990. Jpn. J. Appl. Phys. 30(1991)suppl. 30-1, p. 253.</li> <li>6) H. Takenoshita and M. Kobayashi: J. Electron Microscopy 40(1991)369-373.</li> <li>7) H. Takenoshita and M. Managaki: Proc. 12th Symp. Ultrasonic Electronics, Tokyo, 1991. Jpn. J. Appl. Phys. 31(1992) suppl. 31-1, p. 99.</li> <li>8) H. Takenoshita and M. Tabuchi: Jpn. J. Appl. Phys. 32(1993) 2521.</li> <li>9) H. Takenoshita: Jpn. J. Appl. Phys. 33(1994)3204.</li> <li>10) M. Kobayashi and H. Takenoshita: Jpn. J. Appl. Phys. 33(1994) 6403.</li> <li>11) 竹野下 寛、小林睦生: 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(1994.11.28-30.京都)講演予稿集 p. 41.</li> <li>12) H. Takenoshita and M. Kobayashi: Science Bulletin of Faculty of Education, Nagasaki Univ. (1995) to be published. (6月発行予定)</li> <li>13) R. Castaing: Advances in Electric and Electron Physics, Vol. 13. ed. C. Morton (Academic Press, New York, 1960) p. 317.</li> </ol>
-------------	---

Fig.1. コイル電流



Old unit



New unit

Fig.2. SEMとEAM観察像

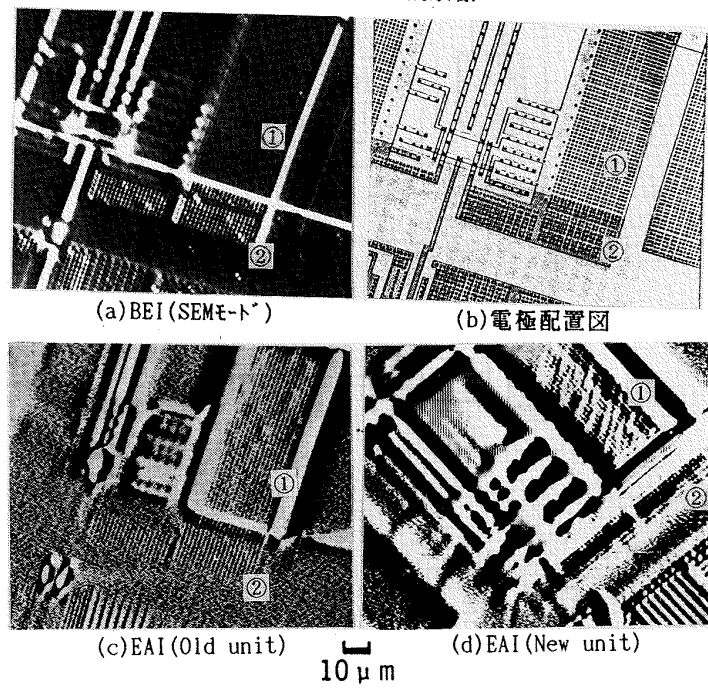
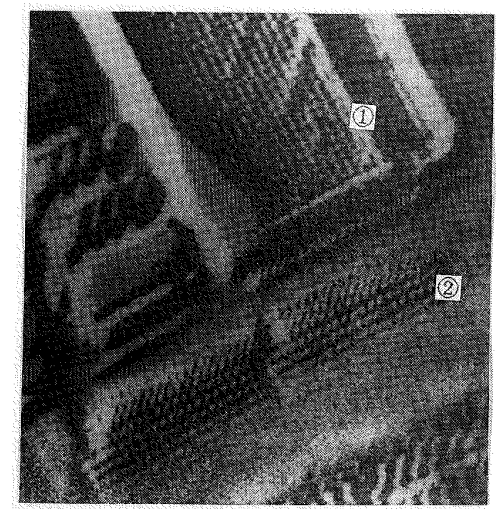


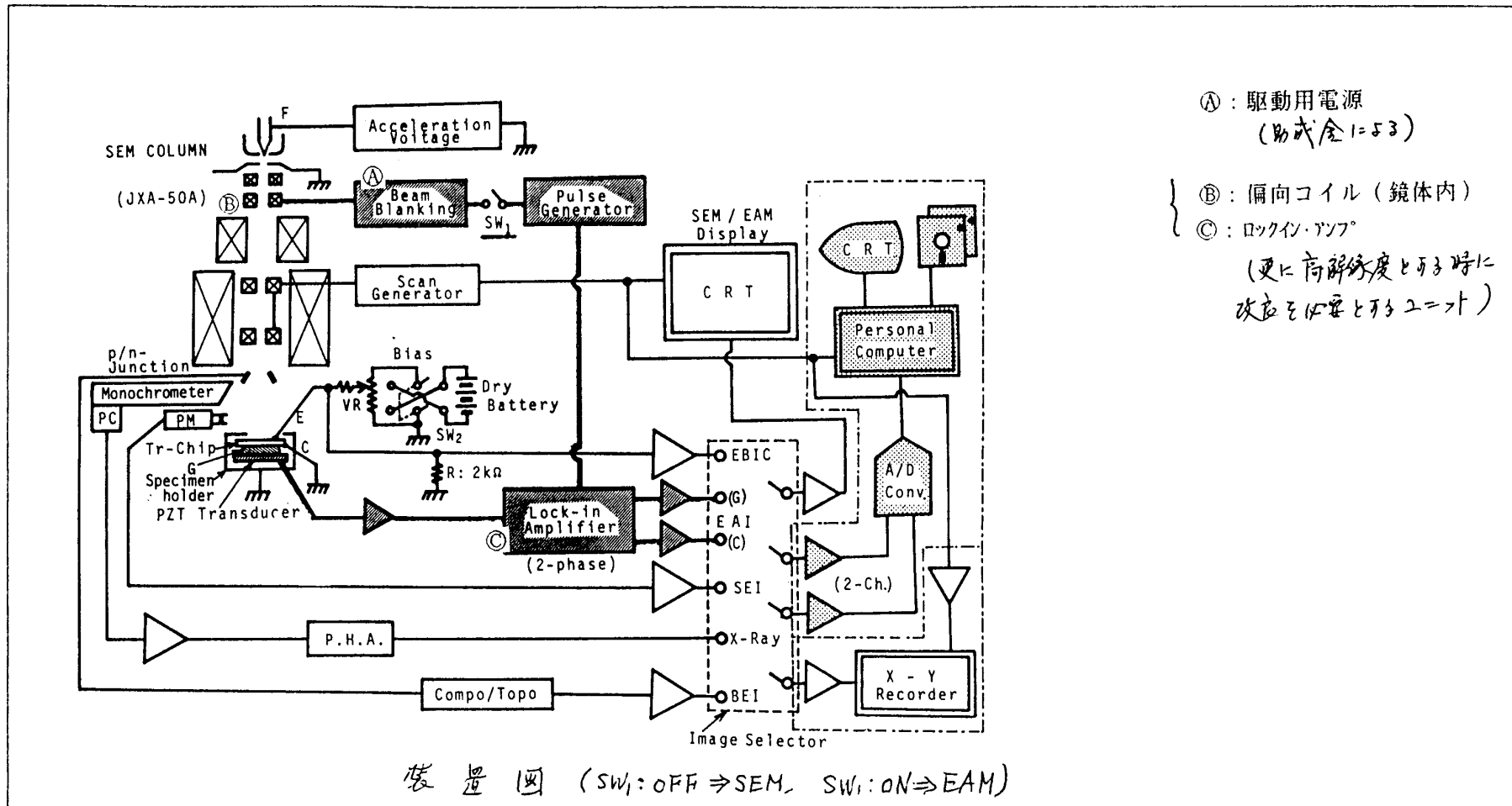
Fig.3. EAI(New unit)の拡大写真



①, ② : 0.8x0.8 μm<sup>2</sup>の配列  
↳ 2 μm

説明書

(6/6)



Ⓐ: 駆動用電源  
(別紙全1-53)

Ⓑ: 偏向コイル (鏡体内)  
Ⓒ: ロックイン・アンプ

(更に高解像度と可子時に  
改定を必要とするユ=ト)

装置図 (SW<sub>1</sub>: OFF ⇒ SEM, SW<sub>1</sub>: ON ⇒ EAM)

(注: フローチャート図, ブロック図, 構成図, 写真, データ表, グラフ等 研究内容の補足説明に御使用下さい)

様式-10