テレビ電子顕微鏡

日立製作所 中央研究所 及 川 充
日 比 正 男
菰 田 孜

電子衝撃導電効果を利用して電子顕微鏡像の輝度増倍を行ないながら、これをテレビ映像化する装置——テレビ電子顕微鏡——の試作、実験を行なった。セレン膜ターゲット、1インチ形低速電子走査管、工業テレビの改造装置を用いた試作装置は、 10^{-11} A/cm² 程度の低電子流密度でビールスなどの微細構造が十分識別できる性能を有しており、輝度増倍効果は解像力向上をも含めると1000倍程度に達する。

1. ま え が き

電子顕微鏡が極微の世界を追求する手段として、現在の科学に不可欠の装置であることは周知であり、その分解能は保証値 $7\text{\AA}$ に達し、さらに良い条件の下では理論的限界値 $3\sim 4\text{\AA}$ に近い値まで得られるようになってい。筆者の一人菰田は先に金の結晶格子により $2.35\text{\AA}$ という世界最高の分解能を得ることに成功している¹⁾。

しかし、像観察の手段については、電子顕微鏡開発の当初よりほとんど改善が行なわれていないのが実情である。電子顕微鏡における像の観察は終像けい光板の像を

直接肉眼で見ることによって行なわれるが、けい光板の輝度不足から暗室操作が必要であるばかりか、試料のいかにによっては直接観察が不可能な場合もある。また、これにより試料の動的変化のシネ撮影を行なう場合には輝度不足に原因し、駒数を極端に落とさねばならないといった不便をさけ得ない。

一方、電子線によって直接感光させる写真撮影の手段が広く併用されているが、像の焦点合わせなどにはけい光板の肉眼観察が必要であり、経験を頼りにする盲撮影を行なわねばならない場合さえ生ずる。これらの問題はすべてけい光板の輝度不足にもとづくもので、電子顕微鏡像の輝度を増倍する装置の出現が以前から切望されていた。

電子顕微鏡像を明るく観察する手段としては、現在までにいくつかの試みがなされているが、大別して次の三つになる。

- 1) 高解像度のけい光体(たとえば単結晶体)を用い、光学顕微鏡で拡大、観察する方法。
- 2) 光電子放射、2次電子放射を利用して順次増倍された電子像をけい光板上に結像する。いわゆるイメージインテンシファイヤ類似装置を用いる方法。
- 3) 電子衝撃導電効果を利用し、テレビ撮像管類似の方式によりテレビ映像を得る方法。

このうち1)はCdS単結晶を液体水素温度まで冷却して10倍の利得を得たという報告²⁾があるが、単結晶の製造法、その発光能率、あるいは顕微鏡観察という問題点があり、実用化に至っていない。2)は各種電子光学的あるいは光学的レンズの導入が必要であり、多くの困難がある。3)は電子衝撃導電効果を利用し、撮像管Ebiconの原理³⁾

筆者紹介

及 川 充 昭和26年、東京大学工学部応用化学科卒業、東京大学工学部専任講師を経て、昭和31年、日立製作所中央研究所に入社。イメージインテンシファイヤ、テレビ電子顕微鏡を試作。光導電、電子衝撃導電材料の研究を中心として、現在ビジコンなど撮像管の研究に従事。工学博士。

日 比 正 男 昭和28年、京都大学工学部電気工学科卒業後、ただちに日立製作所へ入社。中央研究所勤務となる。以来ビジコンなど撮像管ならびに工業テレビ等応用回路の研究に従事し、現在に至る。正会員。

菰 田 孜 昭和29年、日立製作所中央研究所入社。以来、電子顕微鏡の研究、特に高分解能像の研究に従事して現在に至る。東京理科大学物理学科卒。

"The Television Method for the Electron-Microscopy" by Mitsuru Oikawa Masao Hibi and Tsutomu Komota (Central Research Laboratories, Hitachi Ltd., Tokyo)

によってテレビ映像化するもので、M. E. Haine^{4), 5)}らにより試みられている。

筆者らは上記 3) の方式について電子顕微鏡グループとテレビグループの共同研究を行ない、電子顕微鏡像のテレビ映像化——テレビ電子顕微鏡——の開発を行なった⁶⁾。

本方式の完成によって得られる利点は次のようなものが考えられる。

- 1) 低電子流密度 (10^{-11} A/cm² 程度以下) の電子線像をテレビ映像により直接観察できるので、試料面の電子流密度を低下させる*。このため、電子線で破壊されやすい試料の直接観察が可能となる。
- 2) 電子顕微鏡像を明るい部屋で、同時に多数の人が観察できる。
- 3) 電子顕微鏡より離れた場所で像が観察でき、電子顕微鏡の遠隔操作が可能となる。特に、超高圧電子線顕微鏡においてこの遠隔操作は有効な手段となろう。
- 4) テレビ回路の調節によりコントラストをある程度自由に変えるので、複雑な試料の観察が容易となる。
- 5) 電子顕微鏡像を間接的に容易に映画撮影できるので、検鏡試料の速い変化を追跡できる。また、テレビ録画も可能である。
- 6) 電子顕微鏡像の直接テレビ放送が可能となる。

以上の利点は電子衝撃導電性ターゲットの高い電流利得特性による輝度増倍効果と、テレビの導入の二者の組み合わせによってはじめて総合的に得られたものである。

本報告は筆者らの開発、試作した上記テレビ電子顕微鏡に関する種々の実験結果を総合的にまとめたものである。

2. テレビ電子顕微鏡の原理

テレビ電子顕微鏡の構造は図 1 に示すように、電子顕微鏡本体、電子衝撃導電ターゲット、低速電子走査管およびテレビ装置の 4 部より構成される。

電子顕微鏡本体の動作は、電子銃から出た高速電子がコンデンサレンズを経て試料に当たり、これを透過した電子ビームは、さらに対物レンズおよび拡大レンズによって電子線像を形成し、像観察手段——けい光板、写真フィルム、テレビ電子顕微鏡用ターゲット——を衝撃するものである。

* 電子顕微鏡における普通のけい光板観察時の電子流密度は 10^{-10} A/cm² 程度であり、テレビ電子顕微鏡における 10^{-11} A/cm² の値はわずか 1/10 の減少であると考えられやすいが、テレビ電子顕微鏡ではターゲット面上での倍率を小さくしうるので、倍率を考慮した試料 1 要素当たりの電子流密度からいうとほぼ 1/1000 程度になることに注意していただきたい。なお、写真乾板による撮影の場合は、露出 1 秒として 5×10^{-11} A/cm² 程度であることを参考までに付記しておく。

図 1 テレビ電子顕微鏡装置

図 2 電子衝撃導電ターゲットの基本構成

次にテレビ電子顕微鏡用ターゲットは、上記電子ビームが当たると電子衝撃導電効果により電子ビーム量に応じた抵抗変化を生ずる。その構造は図 2 に示すように高速電子ビーム側に電子線透過性のターゲット支持膜があり、これに信号取り出しのためごく薄い導電金属膜がつけられている。この信号取出電極には外部から正の数 10 V の電位が与えられる。ターゲット支持膜には電子衝撃導電性のセレン膜が蒸着され、その表面は図示のように低速度電子の走査によって低速電子走査管の陰極電位に保持される。

このような動作条件下では、電子衝撃導電ターゲットの低速電子走査面側には周知のビジコンと同一原理で、高速電子線像による抵抗変化のため正の電荷模様が形成、蓄積される。この電荷が低速電子の走査によって放電され、信号電極から信号として取り出される。

低速電子走査管はターゲットに対し定められた方式で走査を行なわしめるもので、これに必要な低電圧の電子銃、集束電極などを有する。テレビ装置はターゲットからの信号をテレビモニタ上に表示するための増幅、偏向

などの諸回路から構成されている。

以上がテレビ電子顕微鏡の概略の構成と動作原理である。電子顕微鏡自体の動作やターゲットの信号発生機構などは周知のことであり、詳細は省略する。

3. 電子衝撃導電膜とその特性

3.1 電子衝撃導電膜の概要

本章ではテレビ電子顕微鏡の心臓部ともいべき電子衝撃導電膜に関し、筆者らの得た実験結果について述べる。

ある種の半導体に比較的高いエネルギーの電子ビームを照射すると、そのエネルギーの吸収により半導体内に自由電子および自由正孔が生成され、これらはその易動度および寿命に応じて電気伝導に寄与するため、電気抵抗は低下する。これが電子衝撃導電現象である。これと類似の現象として光導電現象があるが、この場合は最大感度を与える光のエネルギーが半導体禁制帯幅にほぼ近い場合、量子効率は1以下の場合が多い。これに対し、この電子衝撃導電現象では、衝撃エネルギーが高いため1個の衝撃電子によって解放される自由電子—正孔対の数を1以上にすることが容易であり、適当な材料と衝撃条件を選べば非常に大きな電流利得を得ることができる。

衝撃導電材料としては従来よりシリカ、酸化アルミニウム、三硫化砒素、セレン等の薄膜について研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾が行われており、このうち特に、三硫化砒素とセレンの薄膜とが衝撃導電利得が大きい。筆者らはテレビ電子顕微鏡用電子衝撃導電ターゲット用として、主としてセレン膜について研究を行なった。以下セレン膜の電子衝撃導電特性について述べるが、本章の結果はみなサンドイッチ

図3 セレン膜試料の構造と測定回路

図4 衝撃導電電流 i_b と印加電圧との関係

状試料によるものであることを最初に断わっておく。

セレン膜の電子衝撃導電特性を調べるために、筆者らは図3に示すような試料を種々作成した。すなわち、試料はガラス基板上に金属膜、セレン膜、金属膜の順で蒸着した。

衝撃導電材料であるセレンは製作条件により、無晶形、単斜晶形、六方晶形の3種の結晶変態ができるが、テレビ電子顕微鏡ターゲット用として、その原理から明らかに膜の高抵抗性が要求されるので、無晶形セレンを用いた。

無晶形セレンはセレンの鎖状分子が不規則に配列したもので、比抵抗は $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度、p 形伝導が支配的である。次に、セレンを挟む導電金属膜は数10kVの電子線に対して吸収が少なく、その効果が無視できる程度に薄くしてある。

上記材料の特性には、高速電子ビーム源として電子顕微鏡を用いたが、その測定回路は図3に示した。図3においてスイッチ S_1 を閉じれば1次電子電流 (i_p) が測定され、スイッチ S_2 を閉じればセレン膜両面に電圧 v が印加され、電子衝撃導電電流 (i_b) が求められる。電子ビームをしゃへいすれば、暗電流 (i_d) が求められる。

図5 電子線密度と利得との関係の一例

図6 電子線の加速電圧と衝撃導電利得の一例

いま、(1)式のように衝撃導電電流の増加分と1次電子電流の比を利得 G と定義すれば、この G によって衝撃導電膜の感度を表示してゆくことができる。

$$G = \frac{i_b - i_d}{i_p} \quad (1)$$

3.2 セレン膜の衝撃導電特性

(1) 衝撃導電利得と印加電圧および1次電子流密度の関係

電子衝撃導電膜の衝撃導電特性の一例を図4に示す。これは電子線の加速電圧を50kV一定とし、印加電圧は電子線入射側を正極性とした場合である。図4のようにどのような試料でも一般に衝撃導電電流は印加電圧の増大にしたがって増加する。また、同一印加電圧の下では1次電子電流 i_p の小さいほうが利得そのものは高い。この関係は図5によっていっそう明らかである。

このことは、電子顕微鏡のように電子線像の輝度増倍が低電子線密度の場合において特に必要とされる場合、きわめて有利な点といえる。

(2) 衝撃導電利得と加速電圧の関係

衝撃導電利得は加速電圧、したがって1次電子のエネルギーの増大に伴って増大するであろうことは当然予測されるが、ある程度以上加速電圧が大きくなると膜に衝撃効果を与えずに透過する電子線が出てくるので、利得と加速電圧の関係には最大値が現われる。図6はこの関係を示す一例で、実線 (a)、(b) は膜厚を異にし、(a) の場合は膜が厚いため実験範囲では最大値が現われてこなかった。

(3) 衝撃導電特性と膜内電界方向の関係

セレン膜の衝撃導電機構を調べるため、膜にかかる印加電圧の極性を変えて実験した結果を図7に示す。実線 (a) は電子線側電極を正、点線 (b) は電子線側電極に負の電位を与えた場合の加速電圧対電流利得の関係である。この図から両特性にかなりの差があることがわかる。

まず (a) 曲線は印加電圧90Vの場合、加速電圧5.5kVですでに利得が観測され始めるに對し、(b) 曲線の場合、同一印加電圧でも加速電圧が20kVに達しなければ利得が得られない。このことはセレンの伝導機構に関係があり、曲線 (a) の場合は移動距離が長いセレンの自由正孔による伝導にもとづくもので、正極のごく近傍にしか透入しないような低加速電圧の電子線に対しても、印加電圧さえ適当であれば利得が得られるのである。

一方、曲線 (b) は移動距離の短いセレンの電子伝導によるため、十分内部まで電子線が透入しないと自由電子が反対極に到達し得ないものと解釈される。参考までに、薄膜中を透過する電子のエネルギー減衰率に関する Thomson-Widdington の法則、(2)式からこの関係を数値的にあたってみると。

$$V^2 = b\rho d \quad (2)$$

ここで V : 電子の加速電圧

b : 係数——物質によらずほぼ一定で、一般に $4.0 \times 10^{11} \text{ V}^2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$

ρ : 物質の比重

d : 透入深さ

(2)式において、セレンの比重 $\rho = 4.3$ 、曲線 (a) の場合に、 $V = 5.5 \text{ kV}$ 、曲線 (b) の場合に $V = 20 \text{ kV}$ とおく

図7 電子利得と加速電圧

図8 電子衝撃導電ターゲット特性の一例

と、それぞれ $d_a=0.18\mu$, $d_b=2.4\mu$ となり、電子線側電極が正の場合には負の場合にくらべ、電子線のセレン内への透入距離が約1桁程度小さくても、十分利得が観測されていることがわかる。これは、Weimer ら¹⁰⁾の示したセレンの正孔および電子の移動距離の差にもとづくものと考えられる。いずれにしても、1次電子線が負極側を照射する場合は、かなりの電子線の透入深さが必要であることは明らかである。

以上衝撃導電特性について筆者らの基礎的実験結果の一部を紹介したが、導電機構の細部については未知なことが多く、今後の研究にまたねばならない。

最後に、上述の実験を基に試作したテレビ電子顕微鏡用電子衝撃導電ターゲットの特性の一例を示したが、図8のようなターゲット電圧（印加電圧）対利得特性である。図からわかるように、利得は2000倍を越すが、実際の使用に当たっては、偽信号（キズ）の発生を生ずるので、ターゲット電圧の低いところで動作させねばならない。実際動作条件下での利得は普通500~1000倍程度であろう。

なお、セレン膜の残像については、実際の観察にほとんど障害とならない程度であることを付言しておく。

4. 試作テレビ電子顕微鏡装置

4.1 構造の概要

試作テレビ電子顕微鏡装置の外観を写真1に示す。その基本的構造は図1と同様である。本装置は日立 HU-11 A形電子顕微鏡（保証分解能 $7\text{\AA}$ ，加速電圧50~100kV，

表1 テレビ電子顕微鏡の標準仕様

1. 観察可能最低電子流密度: $5 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$
(ただし、ターゲット膜上にて)
2. モニター上の拡大率: けい光板上の約40倍
(ただし14RP4 A使用)ターゲット膜上の約25倍
3. 電源入力 (国内): 100V, 50c/s または 60c/s, 約750VA
4. カメラ, モニタ (含制御器) 間距離: 10m (最大150m)
モニタ, 受像機間距離: 最大1000m
5. テレビ系
 - 1) 走査方式: ランダムインターレース
 - 2) 走査線数: 525本 (60c/s) または 630本 (50c/s)
 - 3) 毎秒像数: 30枚 (60c/s) または 25枚 (50c/s)
 - 4) 映像帯域幅: 6 Mc
 - 5) 解像力: 水平 400本以上
垂直 300本以上
- 6) 同期方式: 電源同期

倍率400~250,000倍)に取り付けしたが、その他の電子顕微鏡にもカメラ室の改造によって取り付け可能である。

電子衝撃導電ターゲットおよび低速電子走査管は、消耗品として容易に交換できる構造になっている。

テレビ装置は、カメラ部、特殊電源を除けば一般のテレビカメラ装置と同様であり、目的に応じて高級機から簡易形まで適当に選ぶことができる。表1はテレビ電子顕微鏡としての標準仕様の一例である。

4.2 電子顕微鏡

テレビ電子顕微鏡に使用する電子顕微鏡本体については、特に述べることはない。ただ、カメラ室のみが電子衝撃導電ターゲットを保持し、低速電子走査管およびテレビカメラ部分が取り付けられるような構造になっていることが普通と異なる点である。電子衝撃導電ターゲットは、前述のように電子顕微鏡カメラ室の下方に保持されているので、高速電子線は観察用けい光板をはね上げ写真乾板を移動すれば、そのままターゲットに入射する。電子顕微鏡では焦点深度が深いので、上記三者の切り替えに際し、あらためて焦点の再調整を行なう必要はない。なお、けい光板や写真乾板に比較してターゲットの有効面積が小さいので、テレビ像は前二者に比して視野が狭いことになるが、これは電子顕微鏡の視野、倍率

写真1 試作テレビ顕微鏡装置外観

写真2 酸化亜鉛結晶のテレビ顕微鏡像

を調整すれば良く、所要の視野をとらえることは比較的簡単にできる。

4.3 電子衝撃導電ターゲット部

電子衝撃導電ターゲットは、電子線透過性の有機絶縁薄膜に金属蒸着膜を介してセレンを蒸着したもので、全体を金属リングに取り付けている。これは適当な絶縁物を介して電子顕微鏡カメラ室へ取り付けられる。また、上記金属リングから信号リードがカメラ室外壁を通して取り出され、外部の増幅器へ接続される。

ターゲットを構成する無晶形セレンは、結晶化による画質低下を生ぜぬよう高温状態での使用は避けねばならない。セレン膜の寿命はこの点に留意すれば実際動作の下でもかなり長い。

4.4 低速電子走査管部

テレビ電子顕微鏡用低速電子走査管は、1インチビジコンとほとんど同一の電極構造であり、外管のみ電子顕微鏡カメラ室への取り付けを考慮して上部を拡大している。電子顕微鏡への取り付けはパッキングを介してなされ、走査管は電子顕微鏡と真空的に一体となっている。

走査管各部電極に印加する電圧は、ヒータ部分を除いては普通のビジコンと同一であり、偏向、集束も解像力の点から電磁方式をとることとした。偏向、集束用コイルアセンブリもビジコンカメラ用のものを使用しているので、必要に応じて高電圧集束など各種特性改善の方策を講ずることが可能である。

4.5 テレビ装置

テレビ電子顕微鏡用テレビ装置はすでに述べたように、どのような形式のものでも使用できるが、第1段階として普通の工業テレビ装置（日立 TIE-4A形）を若干改造して使用した。改造の要点は低速電子走査管の形状

写真3 コロジオン膜孔のテレビ電子顕微鏡像

写真4 タバコ・モザイク・ウイルス（ネガタイプ染色）のテレビ電子顕微鏡像

が若干普通のビジコンと異なるので、電子衝撃導電ターゲットが一樣集束磁界内に入るようコイルアセンブリを修正したことや、所要電源、計器を設けたことなどでありまた、走査管の交換に便利のように走査管回りを極力小形、軽量化し、前置増幅器などはカメラから別に付けて設けた。

このテレビ装置の電気的仕様その他はあまり重要でないので省略する。

ただ、付言したいのはテレビ電子顕微鏡用のテレビ装置は、その画質を写真と比較して論ぜられる場合が多いので、画質の点ではかなり高度の要求があるが、一方、あくまでも電子顕微鏡の付属装置であり、操作者がテレビには素人であるという点から、簡易、安価、安定であることが実用上もっとも必要であろうと考えられる。

5. 実験結果

5.1 テレビ電子顕微鏡による撮像結果

試作テレビ電子顕微鏡を用いて実際に試料を撮像した実験例を最初に示す。

写真2は酸化亜鉛結晶（ZnO）に対するもので、(a)は過焦点の像、(b)は不足焦点の像、(c)は正焦点の像である。過焦点や不足焦点の場合のフレネル干渉縞が明瞭に観察される。これらは従来、けい光板観察によってはかなり困難であった電子顕微鏡の焦点合わせの操作が、テレビ電子顕微鏡を用いて簡単かつ明るい場所で正

確に行なえるようになったことを示す一例である。

次に、写真3はコロジオン膜孔のテレビ電子顕微鏡像で、孔の内側に3本のフレネル干渉縞が認められる。このような多数の干渉縞は試料照射角のきわめて小さい場合にのみ現われるもので、普通、像が暗くてけい光板上では従来まったく観察できなかったものである。

最後の写真4はタバコ・モザイク・ビールス（ネガティブ染色）の像である。このビールスは外径約150Å、内径約40Åの中空間筒状の構造を有していると考えられていたが、この写真はこれを立証するものである。この試料は従来写真撮影によって初めてその構造が判明したのであるが、このように直接肉眼で観察された例は初めてである。以上の写真例はすべて、このテレビ電子顕微鏡がすぐれた電子顕微鏡像の輝度増倍装置であることを示すものと考えている。

5.2 輝度増倍効果

テレビ電子顕微鏡の効果、性能は前節の実験写真から明らかであるが、その輝度増倍効果について考察してみたい。

まず、電子顕微鏡のけい光板輝度とモニタ用ブラウン管の像輝度とを単純に比較してみる。一つの実験例として電子流密度が $9 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ の場合、Spectra Brightness Spot Meter UB $^{1-\frac{1}{2}}$ を用いて測定した結果、けい光板輝度が0.03 ft-L、モニタ像輝度はバックグラウンド0.38 ft-Lに対して0.6 ft-L程度であった。これらの値から、輝度増倍率は7程度となるが、しかし、この比較方法は輝度増加が肉眼の解像度の増加を伴うということだけからも妥当なものとは考えられない。

A. W. Agar は実際の電子顕微鏡について、けい光体の明るさ $B(\text{ft-L})$ と裸眼で判別しうる最小間隔 $\delta_0(\text{cm})$ の関係を実測し、図9の点線のような関係を示した¹¹⁾。なお図の縦軸には筆者らの測定したけい光板上での電子流密度 $\rho(\text{A/cm}^2)$ の値を明るさと対応させて示した。

一方、電子顕微鏡の試料照射電子流密度を ρ_0 、観察しようとする試料間隔を d 、けい光板上に写像された d に対応する間隔を δ とすると、けい光板上の電子流密度 ρ は(3)式のようになる。

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{d}{\delta} \right)^2 \quad (3)$$

(3) 式の関係を図9に実線で示した。図では ρ_0 として 8.5 A/cm^2 （電子顕微鏡で実現可能な最高値）を仮定した。直線 a は $d=3 \text{ Å}$ 、b は $d=8 \text{ Å}$ の場合を示す。けい光板上で間隔 d の試料像が観察できるためには、 $(\delta)_\rho \geq (\delta_0)_\rho$ でなければならないから、 $d=8 \text{ Å}$ の場合にはじめて観察が可能になる。しかし $\rho_0=8.5 \text{ A/cm}^2$ の電子照射を行なうと、たいいていの試料は焼失してしまう

図9 像の明るさと裸眼の解像限界

ので実際的ではない。普通、試料観察に用いる電子流密度は $\rho_0=0.1 \text{ A/cm}^2$ 程度であり、多い場合でも $\rho_0=0.5 \text{ A/cm}^2$ を越えないから、実際にけい光板上で観察できる試料間隔は約 74 Å 、あるいは 32 Å が限界である。

前節のビールス写真は、 $\rho_0=0.02 \text{ A/cm}^2$ 以下で観察されているにもかかわらず、 20 Å 以下の構造まで観察できるので、上記の計算結果と考え合わせると、像観察の場合の解像力が輝度増倍により一段と向上しているのがわかる。

ここで、輝度増倍効果の表示法として倍率、解像度を考慮した輝度因子 $\bar{B}$ を(4)式のように仮りに定義して、この $\bar{B}$ の値を比較することを試みてみよう。

$$\bar{B} = B \left(\frac{M}{\delta} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 M は試料に対する像の倍率である。

けい光板に関する上記諸数値に添字1。モニタブラウン管に関する値に添字2をつけて表わし、けい光板像に対するブラウン管像の倍率を m とすると、輝度倍率は(5)式のように表わせる。

$$\frac{\bar{B}_2}{\bar{B}_1} = \frac{B_2}{B_1} \left(\frac{m\delta_1}{\delta_2} \right)^2 \quad (5)$$

先述の実験例について検討してみると $B_1=0.03 \text{ ft-L}$ 、 $B_2=0.2 \text{ ft-L}$ 、 $m=40$ 、 $\delta_1=0.03 \text{ cm}$ 、 $\delta_2=0.1 \text{ cm}$ が与えられるので、輝度倍率は960倍となる。

この数値はほぼ電子衝撃導電ターゲットの利得に相当する量であり、ある程度妥当な値と考えられるが、しかしなおコントラスト、SN比についての考慮が入っていないので、完全に正当な値とはいえない。

(以下30ページへ)

理論的検討から明らかなように、印加波形のひずみ、回路の損失など種々の要因がパルス波形そのものに与える影響はきわめて少なく、むしろパルスの後に続くリングの大きさを左右する傾向を持つ。

さて、この2乗正弦波パルスは現状ではテレビ伝送系のテスト信号として使っているにすぎず、 $T/2$, T , $2T$ パルスを発生するために要求される Q , ε_d , d および k の値はそれほど困難なものではない。また、写真3, 4に示したように、 n を任意にとることによりパルス駆動発振器として用いることも可能であり、波形誤差などを与える要因が除かれた理想的状態から得られるパルスは、2乗正弦波パルスの標準ともなりうることを考えれば、この発生方式の利用価値は大きいものと思われる。

おわりに、この研究に関し種々ご指導、ご討論いただいた当研究所小池博士、宮地博士、ならびに有益なご助言をいただいた所内各位に感謝の意を表する。

(昭和 39 年 3 月 9 日受付)

付 録

損失が小さいことから (11') の最大値は

$$2L \cdot \frac{i_0}{\tau_0} \left(1 - \frac{\pi}{2Q}\right)$$

と考えてよい。これから次の方程式を得る。

$$\begin{aligned} L \frac{i_0}{\tau_0} \left[1 + \left\{ \frac{1}{2Q} \sin\left(\omega_0 t - \frac{1}{Q}\right) - \cos\left(\omega_0 t - \frac{1}{Q}\right) \right\} e^{-at} \right] \\ \approx L \frac{i_0}{\tau_0} \left(1 - \frac{\pi}{2Q}\right) \end{aligned} \quad (34)$$

まず、 $t = \left(\frac{1}{4} + h_1\right)\tau_0$ として h_1 を求める。

$$\sin\left(\omega_0 t - \frac{1}{Q}\right) = \cos\left(2\pi h_1 - \frac{1}{Q}\right) \approx 1 - \frac{1}{2}\left(2\pi h_1 - \frac{1}{Q}\right)^2$$

$$\cos\left(\omega_0 t - \frac{1}{Q}\right) = -\sin\left(2\pi h_1 - \frac{1}{Q}\right) \approx \frac{1}{Q} - 2\pi h_1$$

$$e^{-at} \approx e^{-\frac{\pi}{4Q}} \approx 1 - \frac{\pi}{4Q}$$

これらを (34) 式に代入し、 h_1 を求めれば

$$h_1 = \frac{1}{4\pi Q} - \frac{1}{4Q}$$

同様に h_2 は

$$h_2 = \frac{1}{4\pi Q} - \frac{1}{4Q}$$

これから (13) 式を得る。

【参 考 文 献】

- 1) Mac Diarmid, I. F.: A Pulse-and-Bar Waveform Generator for Testing Television Links, Proc. Brit. IEE 105, Part B (1958), 440.
- 2) Thomson, W. E.: The Synthesis of a Network to have a Sine-Squared Impulses Response, Proc. Brit. IEE, 99, Part III (1962), 373.
- 3) 片桐他: 昭和 38 年電通全国大会, No. 374.

(24 ページから)

この問題は電子増倍装置の共通の問題でもあり、今後なお検討を要するが、いずれにしても、テレビ電子顕微鏡による観察が、従来のけい光板の肉眼観察に比し、明るさと像分解能力のうえからも一段とすぐれたものであるということは間違いないことであろう。

6. む す び

電子顕微鏡の長年の要求であった直接観察手段の性能向上に関し、電子衝撃導電効果を利用して電子顕微鏡像の輝度増倍およびこれに伴う解像度の改善を行ないながら、これをテレビ映像化する装置——テレビ電子顕微鏡——の試作ならびに実験結果を報告した。この試作装置に用いた電子衝撃導電ターゲットの利得は1000倍以上に達しており、 10^{-11} A/cm² 程度の低電子流密度でピールスなどの微細構造を十分判別できる性能を有している。しかも、この試作装置は実用化に適した構成を有しており、すでに実験の域を脱する程度にまとめられているものである。

テレビ電子顕微鏡の残された問題としては、電子衝撃

導電機構の解明による感度などの諸特性の改善、陰極の長寿命化を含む低速電子走査管の改良、解像力のきわめて高いテレビ装置の開発などであるが、これらはそれぞれの方面の理論、技術の進展に応じて開発が進められてゆくであろう。

終わりに、本稿執筆に当たり種々便宜をいただいた日立製作所計測器事業部、那珂工場、茂原工場ならびに中央研究所の関係各位に謝意を表する。

(昭和 39 年 3 月 25 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 菰田: 電子顕微鏡学会大会講演論文集 (1963).
- 2) E. Ruska: 4th International Conf. Electron Microscopy (1958) 104.
- 3) Decker 他: IRE National Convention Record, III (1957) 156.
- 4) M. E. Haine 他: Proc. IEE, **109** (1962) 185.
- 5) M. E. Haine 他: J. Sci. Inst., **35** (1958) 466.
- 6) 菰田他: 電顕学会大会講演論文集 (1963).
- 7) Pensak: phys. Rev., **75** (1949) 472.
- 8) Ehrenberg 他: Proc. Phys. Soc., **A64** (1951) 362.
- 9) W. E. Spear 他: Proc. Phys. Soc., **B69** (1956) 1139.
- 10) P. K. Weimer 他: RCA Rev., **12** (1951) 306.
- 11) A. W. Agar: Brit. J. Appl. Phys., **8** (1957) 410.